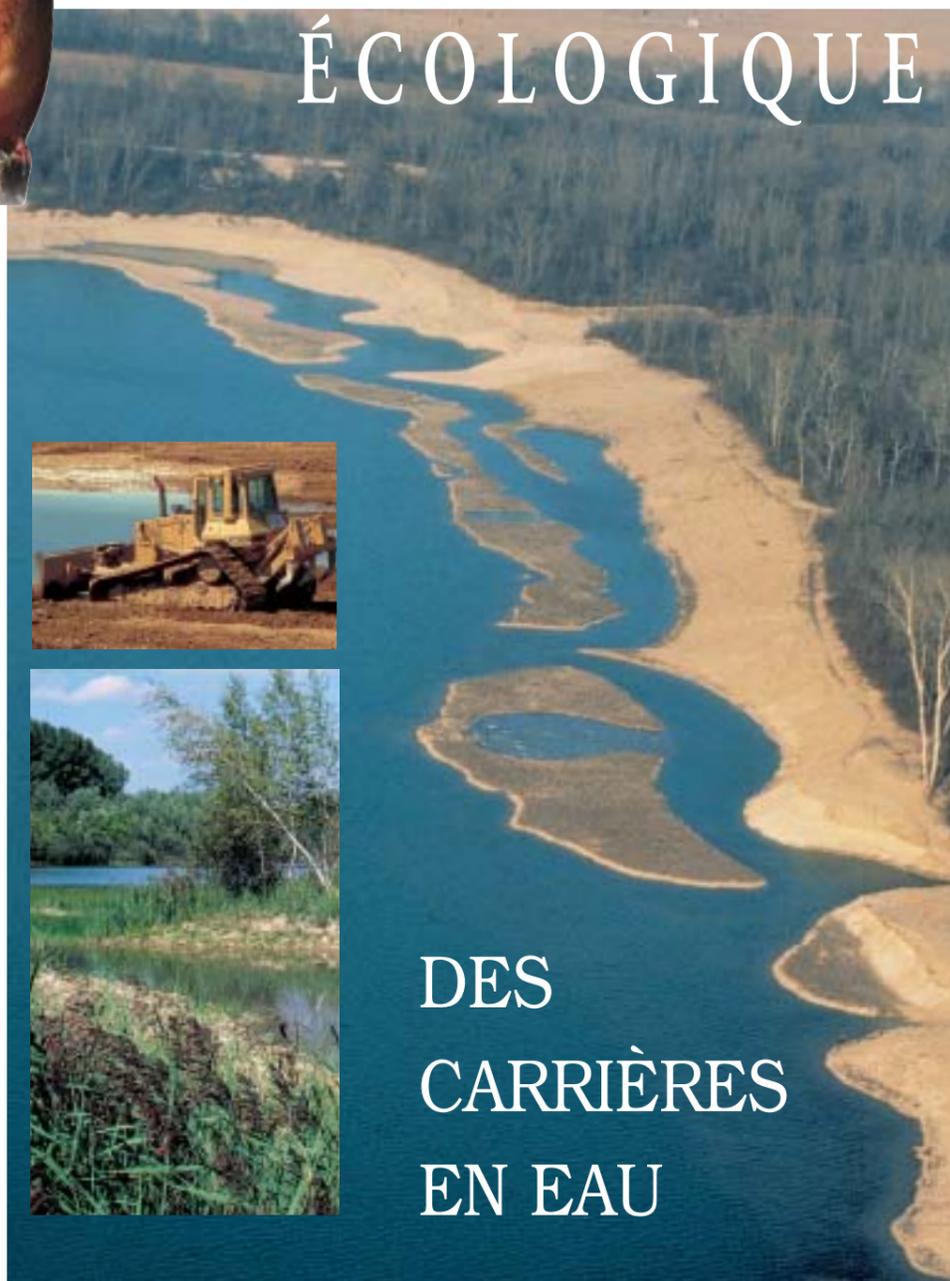




— AMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE



DES
CARRIÈRES
EN EAU

GUIDE PRATIQUE



Comité National de la Charte Professionnelle de l'Industrie des Granulats
3, rue Alfred Roll - 75017 Paris
Téléphone : 01 44 01 47 01 - Télécopie : 01 46 22 59 74 - www.unicem.fr

Document réalisé par Écosphère
3, bis rue des Remises - 94100 Saint-Maur - Tél. 01 45 11 24 30 - Télécopie 01 45 11 24 37 -
Courrier électronique ecosphere@ecosphere.fr



Ce guide à l'usage des décideurs et aménageurs a été réalisé et financé sous l'égide du **COMITÉ NATIONAL DE LA CHARTE**



Cet ouvrage n'existerait pas sans le talent et le travail de Philippe DASNIAS, brusquement disparu en octobre 2001 à l'âge de 42 ans.

Après un D.E.A. d'écologie à Chambéry, Philippe obtenait son doctorat à l'Université de Grenoble où il a soutenu sa thèse en 1987 sous l'égide du professeur OZENDA. Son savoir-faire l'a ensuite amené au CEMAGREF, puis à rentrer en 1988 au CERREP de Grenoble, bureau d'études où il travailla sur divers projets.

Sa spécialisation dans le domaine des carrières remonte à 1989, année où il rejoint le bureau d'étude ENCEM. Il fut d'abord chargé des études d'impact, puis devint responsable de l'antenne de Paris et enfin Chargé National pour l'Écologie.

En 1991, son penchant pour l'écologie, l'amena à rejoindre ÉCOSPHÈRE, dont il devint rapidement l'un des principaux collaborateurs. À ce titre, il a coordonné de nombreux projets, et a naturellement été chargé de l'élaboration du programme de recherche engagé à partir de 1995 par le Comité National de la Charte (CNC).

Il est en particulier l'auteur des 5 ouvrages "carrières et zones humides" publiés en 2000 par le CNC.

À partir de 2000, Philippe s'est consacré à l'élaboration de ce guide pratique. Il en a défini les contours, rédigé les textes, sélectionné les illustrations et même réalisé la plupart des figures techniques.

Ce document n'est pas le fruit d'une simple synthèse des quelques publications disponibles sur le sujet, mais un travail totalement original, fruit d'une irremplaçable expérience. La disparition prématurée de Philippe est celle d'un des meilleurs spécialistes français et internationaux de l'écologie des carrières.

LA RÉDACTION DE CE GUIDE A ÉTÉ SUIVIE PAR UN COMITÉ DE PILOTAGE COMPOSÉ DE :

- Professeur Jean-Claude LEFEUVRE (MNHN-IEGB), Président du comité scientifique
- Christian BERANGER (Morillon Corvol), Président du comité de pilotage
- Arnaud COLSON (Lafarge granulats)
- Patrick LECOMTE (GSM)
- Louis de MAUPEOU (UNPG)
- Bernard du PEYROUX (Président du Comité National de la Charte)
- Pierre de PREMARE (Lafarge granulats)

LA MAÎTRISE D'ŒUVRE (RÉDACTION ET COORDINATION) A ÉTÉ ASSURÉE PAR ÉCOSPHÈRE :

- **Rédaction** : Philippe DASNIAS
- **Coordination** : Jean Christophe KOVACS
- **Dessinateurs** : Mathieu COURCOUX (ENCEM) et Michel PAJARD (Ecosphère)
- **Création graphique** : Jean-François DEJONGHE (Quetzal communication)

Photographies de couverture :

Site réaménagé de Miribel-Jonage (Rhône)

(photo CNC-J.-L. MICHELOT)

Roselière à Épisy (Seine-et-Marne)

(photo Écosphère-M. PAJARD)

Aménagement d'une berge en pente douce

(photo Lafarge granulats)

Ci-dessous : Reconstitution d'une zone marécageuse dans la Bassée (photo Écosphère-Ph. DASNIAS)



REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a été conçu et rédigé par Philippe DASNIAS. Il a bénéficié des conseils avisés des membres du Comité de pilotage et du savoir-faire des collaborateurs d'ÉCOSPHÈRE, en particulier Véronique LELOUP et Michel PAJARD, et d'ENCEM (Mathieu COURCOUX).

La conception de la maquette doit tout à Jean-François DEJONGHE qui avec patience et compréhension a su intégrer les attentes des uns et des autres et proposer des solutions élégantes à des problèmes de mise en pages parfois complexes.

Enfin, ils nous est agréable de remercier toutes les personnes ayant contribué à cet ouvrage par leurs conseils, en particulier Gérard ARNAL (CBNBP), Gérard BAUDOIN et Jean-Philippe SIBLET (DIREN Ile-de-France) ainsi que les photographes ci-après.

Crédit photographique : G. ARNAL, P. BOUDIER, CAE, M. CAMBRONY, P. DASNIAS, J.-F. DEJONGHE, ECTARE, ENCEM, R. EVE, IARE, P. JULVE, LAFARGE GRANULATS, F. LE BLOCH, V. LELOUP, Y. LESCOUARNEC, S. MAHUZIER, J.-L. MICHELOT, M. PAJARD, M. THAURONT, A. ULMER, M. VASLIN.

Introduction de Bernard du PEYROUX

Président du Comité National de la Charte

L'histoire du développement économique et social des cinquante dernières années se confond, pour les producteurs de granulats, avec leur propre histoire, mouvementée s'il en est. En effet, en moins de deux générations, il leur a fallu d'abord assurer la satisfaction d'une demande en matériaux toujours plus grande, dans un contexte réglementaire, au départ, quasi inexistant, puis apprendre à se discipliner sous l'effet d'une législation de plus en plus complexe et rigide, enfin entrer avec détermination dans une démarche proactive, intégrant la formation des hommes, des efforts en recherche et développement, la mise en place de nouvelles techniques d'exploitation plus élaborées, afin d'atteindre un double objectif : d'une part assurer de façon pérenne -en quantité et en qualité- l'approvisionnement en granulats des marchés de la construction et des travaux publics, et, d'autre part respecter l'environnement social et naturel dans lequel l'extraction s'insérait, ce à quoi la Charte environnementale de l'industrie des granulats s'est employée de son mieux avec un nombre croissant d'adhérents depuis sa création en 1992. Ce second objectif intègre à l'évidence tout ce qui touche à la remise en état des sols après exploitation, y compris sa dimension d'aménagement durable du territoire.

Cette remise en état, devenue au fil du temps une donnée essentielle de la vie de toute carrière, s'est peu à peu diversifiée et affinée. Ainsi, et puisque ce sont les aménagements en eau qui nous préoccupent dans cet ouvrage, si les vocations d'étangs de pêche, d'espaces de loisirs autour d'un plan d'eau et dans certains cas de bases de loisirs se sont faits jour les premières, c'est pour la double raison suivante : d'une part ces aménagements répondaient à une réelle attente sociale ; d'autre part, nul n'imaginait vraiment une autre affectation à ces espaces. Quant à une éventuelle vocation écologique, ce dernier terme paraissait encore antinomique du mot carrière.

La nature, ignorante des mots et ne se satisfaisant pas des idées toutes faites que nous fabriquons si souvent, s'est souverainement emparée des espaces modifiés qui lui étaient offerts et, peu à peu, il a bien fallu reconnaître que le potentiel écologique de certains sites ainsi que leur valeur comme zone humide méritaient qu'on y prête attention. C'est ainsi qu'avec l'apport incontournable d'un Comité Scientifique, dont le Professeur Jean-Claude LEFEUVRE fut le pivot central, la Charte a développé une étude technique qui s'est traduite par un document en cinq volumes et un colloque international en mars 2000.

Ces études, et les contacts avec le monde scientifique qui en ont résulté, nous ont naturellement conduits à vouloir rassembler en un ouvrage les enseignements pratiques en matière de remise en état écologique d'une carrière en eau. C'est donc la vocation première de ce livre d'être un outil pratique pour les exploitants de granulats, dès lors qu'ils ont à mener à bien un aménagement écologique.

Néanmoins, un tel ouvrage n'est qu'une étape sur un long chemin à parcourir. Il ne pourra l'être qu'avec l'apport des compétences de tous et ne vaudra que par sa cohérence avec les autres programmes de recherches nationaux sur ce thème.

Je formule donc le souhait que, dans ce domaine de l'écologie comme dans d'autres qui intéressent aussi la vie et l'après-vie des carrières, nous ayons de nouvelles occasions de travail avec des scientifiques de nombreuses disciplines, comme de tous horizons, et des gestionnaires des milieux recréés.



Préface par Jean-Claude LEFEUVRE

Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle

Directeur de l'Institut d'Ecologie et de Gestion de la Biodiversité

Pendant des siècles, soit pour assurer la navigation ou pour se protéger des crues, pour récupérer des terres agricoles, pour construire des villes " les pieds dans l'eau " en minimisant les inondations, nous avons canalisé nos fleuves et nos rivières, nous avons isolé les lits majeurs et les plaines d'inondation des lits mineurs, nous avons poldérisé des zones humides, nous avons détruit les zones de tressage, rectifié les cours d'eau en supprimant les méandres. Pour fournir de l'énergie hydraulique, pour assurer la distribution d'eau potable, pour irriguer, pour en principe lutter contre les crues, pour créer des plans d'eau de loisirs, pour maintenir des débits d'étiage à des rivières dépossédées de leurs eaux, nous avons créé des barrages. Parallèlement nous avons fait de nos rivières le réceptacle des effluents de nos villes, de nos industries et de la pollution diffuse des bassins versants transformés pour les besoins d'une agriculture toujours plus intensive.

Pendant le même temps, le développement des villes, des ouvrages d'art, l'extension du réseau routier ont, en raison de progrès techniques tels la découverte du béton, des enrobés... contraint à l'ouverture de multiples carrières d'extraction de granulats non seulement dans les plaines d'inondation mais aussi dans le lit des fleuves. Notre société est ainsi faite qu'elle peut exiger que l'on réponde à ses besoins sans se rendre compte qu'y répondre nécessite d'occasionner des dégâts supplémentaires à des milieux naturels qui ont déjà beaucoup souffert de nos activités.

Il serait vain en effet de prétendre que l'extraction des granulats, comme bon nombre d'autres activités, est sans effet sur les habitats naturels de la faune et de la flore, ne perturbe pas les systèmes hydrologiques des plaines alluviales qui "bénéficient" de gravières, ne compromettent pas, au moins temporairement leur fonctionnement général et celui des rivières auxquelles elles sont connectées...

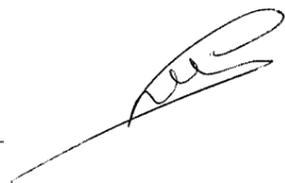
On sait maintenant qu'au siècle dernier, une exploitation intensive des matériaux alluvionnaires dans le lit des cours d'eau, exploitation qui a négligé d'évaluer ce qui pouvait être prélevé annuellement, a conduit à un enfoncement de ce lit qui, en certaines circonstances, a pu atteindre quelques mètres. On peut lister, comme pour toutes les actions citées ci-dessus, les dégâts occasionnés par cette pratique : enfoncement de la nappe d'accompagnement des fleuves, perte de la biodiversité par disjonction entre le lit mineur et ses annexes hydrauliques (bras morts, lônes, boires...), déchaussement des ouvrages d'art, apparition de seuils... Ainsi, le volume extrait de l'Ardèche pendant 20 ans à l'aval de Ruoms a été évalué à 4 milliards de m³ alors que, dans le même temps, l'apport moyen de la rivière a été de 1,3 millions de m³ (SOGREAH, 1993). Le bassin de la Loire produisait encore en 1993 30 millions de tonnes de matériaux alluvionnaires (près de 10 % de la production nationale) dont une bonne partie provenait du lit du fleuve et ce, malgré le décret du 10 décembre 1979 interdisant d'extraire des matériaux du lit des fleuves. En mettant fin définitivement aux extractions dans le lit mineur des cours d'eau, la loi du 23 juin 1994 a bloqué une pratique qui aurait pu ne pas provoquer d'aussi importants dégâts et qui aurait même pu perdurer si l'extraction n'avait porté que sur les intérêts (les apports annuels) et n'avait pas compromis le capital.

Les granulats d'origine alluvionnaire sont considérés comme les matériaux les plus "nobles". De ce fait, la production nationale a augmenté notablement de 1960 à 1999, avec des chutes de production dont l'une est liée en partie à l'interdiction d'extraction de granulats dans le lit mineur. Seules sont donc autorisées actuellement, avec un encadrement législatif de plus en plus contraignant, les extractions en lit majeur en sachant que la loi sur l'eau du 30 janvier 1992 institue les SDAGE qui peuvent réguler les activités extractives dans les vallées des cours d'eau et qu'assurer la protection de l'environnement est un préalable indispensable à l'ouverture d'une carrière. Une partie de ces contraintes résulte d'un antagonisme latent qui pendant près de trente ans a opposé les carrières et les protecteurs de l'environnement. Cette opposition n'a pu que s'amplifier au fur et à mesure que la connaissance sur le fonctionnement des zones humides et de leur liaison avec les fleuves et les rivières progressait.

Les producteurs de granulats, les premiers parmi les industriels à avoir admis les dégâts qu'ils occasionnent, ont aussi été les premiers à vouloir restaurer la qualité écologique des espaces exploités. Leur regroupement au sein de l'UNPG et de l'UNICEM est à l'origine de la charte de l'Industrie des Granulats qui a, dans ses objectifs, de convaincre la profession que produire des granulats, gérer les ressources existantes, prendre en compte l'environnement et aménager le territoire sont des activités compatibles. Grâce aux études financées par la taxe parafiscale dans un premier temps puis plus récemment sur la base d'un inventaire des richesses naturelles effectué sur 17 sites exploités à des dates plus ou moins éloignées, répartis sur l'ensemble du territoire des 6 Agences de l'Eau, l'on sait maintenant que des carrières réaménagées constituent une opportunité formidable pour le maintien d'une biodiversité faunistique et floristique nationale en régression, avec 1001 espèces de plantes vasculaires sauvages (soit 17 % de la flore de France) et 132 espèces d'oiseaux nicheurs (soit 48 % de cette avifaune) trouvées sur ces 17 sites. Ces résultats ont été exprimés parmi bien d'autres au colloque international qui s'est tenu en mars 2000 sur le thème de la biodiversité et de l'écologie des carrières en eau où il a été question non seulement de la restauration de la qualité écologique des milieux mais aussi d'explicitier et gérer les services rendus par les écosystèmes afin de convaincre de la nécessité de leur restauration. Se basant également sur une analyse bibliographique effectuée au niveau international, le guide technique qui est mis à votre disposition fait état des savoir-faire techniques recensés au cours de ces diverses études afin de créer des écosystèmes de substitution et de développer des modalités de gestion destinées à assurer la durabilité des écosystèmes ainsi restaurés ou créés.

"Recréer la nature" fait partie à mon sens des plus belles ambitions que devrait avoir notre société au début du XXI^e siècle, en sachant qu'il s'agit d'une nécessité absolue si nous voulons continuer à bénéficier des services gratuits rendus par les écosystèmes (régulation du climat, du cycle de l'eau, contrôle des pollutions...) services qui sont indispensables à un développement durable.

En participant à ce formidable et néanmoins nécessaire projet, les industriels des carrières aideront d'ailleurs à la création d'une ingénierie écologique définie par MITSH (1989) comme "*l'ambition de créer un système intégrant la société humaine à son environnement naturel pour le plus grand bénéfice des deux*".



Comment utiliser ce guide

Le Comité National de la Charte Professionnelle de l'Industrie des Granulats s'est engagé depuis plusieurs années dans un ambitieux programme de recherche sur l'écologie des carrières en eau.

À l'issue de ce programme, il s'est avéré que les documents techniques, utilisables par les exploitants étaient très dispersés et qu'il n'existait pas en France d'ouvrage synthétique rassemblant l'essentiel des informations nécessaires à la conception et à la réalisation des travaux d'aménagement et de valorisation écologique des carrières en eau.

C'est pourquoi, le Comité a souhaité mettre à la disposition du public, un ouvrage pratique bénéficiant des dernières connaissances dans ce domaine en pleine évolution conceptuelle et pratique.

Contenu du guide

Ce guide met l'accent sur les carrières de matériaux alluvionnaires situées dans le lit majeur des rivières, mais traite également des carrières de roches massives concassées (schistes, calcaires durs...) qui offrent parfois l'opportunité de créer de nouvelles zones humides d'intérêt écologique.

Outre l'introduction, qui resitue les enjeux du réaménagement des carrières par rapport à l'évolution récente des zones humides, le guide comprend 5 chapitres principaux :

1) Écologie des carrières en eau : Ce chapitre a pour objet de rappeler succinctement les notions d'écologie utiles à l'aménagement des carrières ainsi que les principales caractéristiques physiques et biologiques des carrières en eau (nature des matériaux disponibles, communautés végétales et animales, zonation verticale et horizontale de la végétation et de la faune...).

2) Fixer des objectifs précis : Ce chapitre est destiné aux personnes qui ne sont pas encore fixées sur la destination finale de la carrière et qui s'interrogent sur l'opportunité d'un aménagement écologique total ou partiel. Il propose une démarche d'analyse de projet, une évaluation des atouts et des contraintes, et conclut sur les grands types d'objectifs écologiques à poursuivre.

3) La conception du plan d'aménagement : À ce stade, la décision de procéder à un aménagement écologique a été prise. Ce chapitre présente les paramètres essentiels à prendre en compte dans l'élaboration du schéma d'aménagement (matériaux disponibles, organisation de l'espace, sélection et assemblage des différents types de milieux naturels à reconstituer...) et les concepts de reconnexion du site avec son environnement en fonction des types de milieux rencontrés aux abords. Un chapitre spécial est consacré à l'intégration hydraulique du projet, notion fondamentale pour l'aménagement des carrières dans les corridors fluviaux. La dernière partie porte sur l'aménagement du site en vue du contrôle des accès et de la fréquentation.

4) Les travaux d'aménagement et de végétalisation : Ce chapitre, résolument pratique, présente le contenu de l'Avant-Projet Détaillé (A.P.D.), l'organisation du chantier, les travaux de terrassement (profilage des berges, reconstitution des sols), de végétalisation (boisements, plantations, engazonnements...) et d'aménagement hydraulique. En complément, des conseils particuliers sont donnés concernant l'utilisation d'anciens bassins de décantation des fines de lavage, les techniques de renaturation d'anciennes gravières, l'introduction d'espèces animales et les aménagements destinés à l'accueil du public.

5) Aménagement et entretien d'habitats : Ce chapitre, également très pratique, passe en revue les principaux types de milieux (vasières, roselières, prairies, mares, îlots...) susceptibles d'être reconstitués sur carrières. Pour chacun d'entre eux est précisé : les caractéristiques écologiques,

les travaux d'aménagements et de végétalisation, les modalités de gestion.

Des précisions sont fournies en annexe, avec :

- une présentation des expertises écologiques et hydrologiques à mener préalablement à l'élaboration d'un projet d'aménagement de carrière ;
- la description d'une méthode visant à définir des objectifs d'aménagement écologiques en terme d'habitats, d'espèces cibles ou de fonctionnalité.

UTILISATION PRATIQUE DU GUIDE

Cet ouvrage est destiné à l'ensemble des organismes et personnes directement ou indirectement concernés par l'aménagement écologique des carrières en eau, en premier lieu aux exploitants (responsables environnement et exploitation, chefs de carrière...), ainsi qu'aux bureaux d'étude, aux administrations compétentes (DIREN, DRIRE, DDAF, DDE, Services de la navigation...), aux naturalistes et associations spécialisées, aux scientifiques, et plus généralement à toute personne s'intéressant à l'aménagement du territoire, à la restauration et à la gestion des zones humides ou plus globalement à la préservation de l'environnement.

Ce guide n'est pas un "livre de recettes" décrivant des solutions applicables en l'état n'importe où, mais un ouvrage pratique présentant en détail un cadre méthodologique et une multitude de solutions techniques à adapter au contexte de chaque projet. Il n'est pas destiné à être lu *in extenso*, mais à être utilisé en fonction de besoins particuliers, plus ou moins précis. Ainsi, les premiers chapitres traitent essentiellement des aspects théoriques sous-tendant la définition des projets d'aménagements écologiques. Ils intéresseront plus particulièrement les personnes intervenant sur la conception des projets ; tandis que les deux derniers chapitres sont résolument pratiques et concernent les chefs de carrières et personnes ou organismes assurant la maîtrise d'œuvre des chantiers.

L'ensemble de l'ouvrage est richement illustré par plus de 200 photographies et schémas originaux visant à faciliter la compréhension des concepts et la mise en œuvre pratique des mesures proposées.

En complément, le lecteur trouvera à la fin du guide :

- un **lexique**, définissant l'ensemble des termes techniques et scientifiques ;
- une **bibliographie** sommaire, permettant d'approfondir certaines questions.

La citation de ce guide dans les références bibliographiques doit se faire de la manière suivante :

DASNIAS Ph. (ECOSPHERE) - 2002 - Aménagement écologique des carrières en eau : Guide pratique, UNPG, Paris : 208 pp.

Carrières et zones humides

Il est aujourd'hui acquis que les carrières en eau aménagées écologiquement peuvent jouer un rôle efficace de zone humide, 1°) comme élément du système global et solidaire qu'est le bassin versant et 2°) comme biotope de substitution ou de complément pour les espèces fragilisées par la disparition des zones humides. L'ambition de ce guide est d'aider à aménager les carrières dans ce sens, depuis les phases de réflexion et de conception jusqu'aux phases de travaux et d'entretien. Rappelons cependant dans un premier temps dans quel contexte est apparue l'idée d'aménagement écologique des carrières en eau.

L'utilisation d'espace par les carrières alluvionnaires

La production de granulats induit inévitablement une consommation d'espace. Les granulats proviennent pour moitié de gisements de sables et graviers alluvionnaires (gravières, sablières, ballastières) et pour moitié de gisements de roches massives concassées (schistes, calcaires durs, etc.). Or si ces derniers atteignent couramment des puissances de plusieurs dizaines de mètres, les gisements alluvionnaires ne dépassent guère quelques mètres (sauf exception comme dans la vallée du Rhin). Les carrières alluvionnaires consomment donc plus d'espace que les carrières de roches massives. On peut estimer qu'en France, ce sont 1 500 ha à 2000 ha qui sont annuellement exploités pour leurs sables et graviers. Ces chiffres n'ont rien d'exceptionnel, mais les gravières ne s'établissent pas n'importe où : elles sont nécessairement localisées dans les vallées, ce qui concentre leur consommation d'espace. Il se trouve de surcroît que les plaines alluviales sont des espaces plus peuplés que les autres et très convoités pour leurs richesses économiques : nappes phréatiques, terres agricoles ou sylvicoles, voies de communication fluviale, terrains plats facilement constructibles et bien sûr granulats.

Les carrières alluvionnaires et l'environnement

Plus récemment sont apparues des préoccupations liées à l'environnement. La notion de bassin versant s'est imposée comme unité de compréhension des phénomènes et des aménagements, en particulier avec la création des Agences de Bassins (aujourd'hui Agences de l'Eau). On a reconnu que l'eau était le lien solide essentiel unissant entre elles toutes les parties d'un bassin ainsi que les actions menées sur celui-ci. La vallée est fragile parce qu'elle est tributaire de tout ce qui se déroule à l'amont : remembrements, drainages, remblaiements des zones d'expansion des crues... Dans ce nouveau cadre de réflexion, la prise en compte des carrières alluvionnaires dans une approche globale du bassin versant est devenue nécessaire.

Parallèlement, et d'une manière plus générale, la dégradation des paysages et des milieux a suscité des inquiétudes sur notre cadre de vie et sur notre capacité à préserver les espaces naturels. Là encore, la vallée est en première ligne : ses paysages traditionnels constitue un remarquable patrimoine et l'on y trouve des milieux naturels humides ou inondés de grande valeur

écologique. Et pourtant, les vallées alluviales sont parmi les espaces qui ont été les plus modifiés au cours des dernières décennies. Les carrières ont souvent symbolisé la dégradation des paysages alluviaux, même si elles n'en constituaient qu'une des causes. Cette image péjorative des gravières a des explications : d'abord le public se fait souvent une idée vague de leur utilité économique, ensuite il est vrai que dans bien des vallées on a vu se multiplier de petits plans d'eau rectangulaires sans grand attrait ni esthétique, ni biologique ; enfin, il n'est pas impossible que dans l'imaginaire, le prélèvement définitif d'une partie du sous-sol suivi de la restitution d'un " trou en eau " ait quelque chose de désagréablement irréversible.

L'après carrière

Mais l'industrie des granulats n'est pas la seule activité économique à devoir prélever des terrains. Par ailleurs les carrières ont, par rapport aux autres emprises industrielles, une particularité essentielle : après exploitation, elles sont restituées ; certes, ce n'est pas l'espace initial qui est restitué, mais un espace a priori vierge de toute destination et donc disponible pour le bénéfice de la collectivité. Cette opportunité est assez vite apparue lorsque les gravières se sont multipliées. À une certaine époque, on a beaucoup privilégié les remises en état agricoles ; ce type de réutilisation paraissait logique dans la mesure où la plus grande partie des terrains exploités par les carrières alluvionnaires sont des terres cultivables. Cependant, ce type d'aménagement est souvent onéreux (importants travaux de terrassement et de sous-solage) pour une productivité qui n'est pas toujours au rendez-vous. Par ailleurs, le contexte a changé : pourquoi remblayer des carrières pour faire de médiocres sols agricoles, alors que par ailleurs on subventionne des mises en jachères ? Une autre vocation a souvent été donnée aux carrières alluvionnaires parvenues en fin d'exploitation : celle de zone récréative incluant des vocations diverses comme la pêche, la chasse, la promenade. La forme la plus élaborée de l'aménagement ludique est la base de loisirs nautiques. L'opportunité des zones récréatives est particulièrement évidente dans les zones urbaines, là où pour des raisons de coût de transport, les gisements ont été les premiers exploités. Cependant l'offre de ce type d'endroit est devenue importante et la demande n'est pas extensible à l'infini. D'autre part, les gisements s'épuisant, les gravières s'éloignent progressivement des centres urbains.

Exemples de zones humides dans différents types de carrières

Photo 1. Gravière en lit majeur, régulièrement balayée par les inondations : vallée de la Moselle (CNC - M. Vaslin).

Photo 2. Zone humide dans une carrière de calcaire : Seine-et-Marne (G. Arnal).

Photo 3. Zone humide développée sur le carreau d'une carrière de schiste : Morbihan (CNC - ENCEM).

C'est dans ce contexte que l'idée de restituer une zone naturelle s'est développée. D'une part, on a souhaité des zones récréatives présentant un aspect de plus en plus attrayant au plan paysager et biologique : on a voulu des îles, des roselières, des oiseaux... D'autre part, les naturalistes se sont intéressés à la vie sauvage qui colonisait spontanément les carrières en eau. De ces différents mouvements est née la notion d'aménagement écologique. Il s'agit alors de recréer un site, généralement ouvert au public, où les travaux d'aménagement sont orientés vers la valorisation de l'intérêt écologique de la carrière, en jouant sur ses particularités et en l'intégrant à son environnement naturel et paysager.

Les carrières en eau comme zones humides

La question de l'aménagement écologique des carrières en eau peut s'envisager sous deux angles. Premièrement quelles sont les caractéristiques d'une exploitation de granulats qui puissent se transformer en opportunités écologiques, deuxièmement quels peuvent être les rôles d'un site naturel issu d'une carrière en eau ? La principale opportunité écologique d'une carrière en eau est sans doute la présence, à hauteur des berges, de milieux engorgés ou inondés sous une faible lame d'eau. Ces milieux appartiennent à la catégorie des *zones humides*. Or, les zones humides sont en forte régression : en 50 ans, l'Europe de l'Ouest a perdu plus des deux tiers de ses superficies de marais, marécages, prés humides et autres tourbières, le plus souvent drainées à



Les pays de l'Union Européenne produisent 5,8 tonnes de granulats par habitant et par an. En France, la production s'établit, selon les années, entre 300 et 400 Mt, soit une consommation d'environ 20 kg par habitant et par jour. Ces chiffres font des granulats le bien naturel le plus consommé après l'air et l'eau. Il s'agit d'une production vitale pour une économie industrialisée puisque les granulats servent, pour parts à peu près égales, à la construction et l'entretien des réseaux de transport et au bâtiment. Ils sont utilisés avec des liants pour la fabrication des bétons ou des enrobés, ou sans liant dans les couches de fondation des routes, le ballast ferroviaire, les matériaux de remblai...

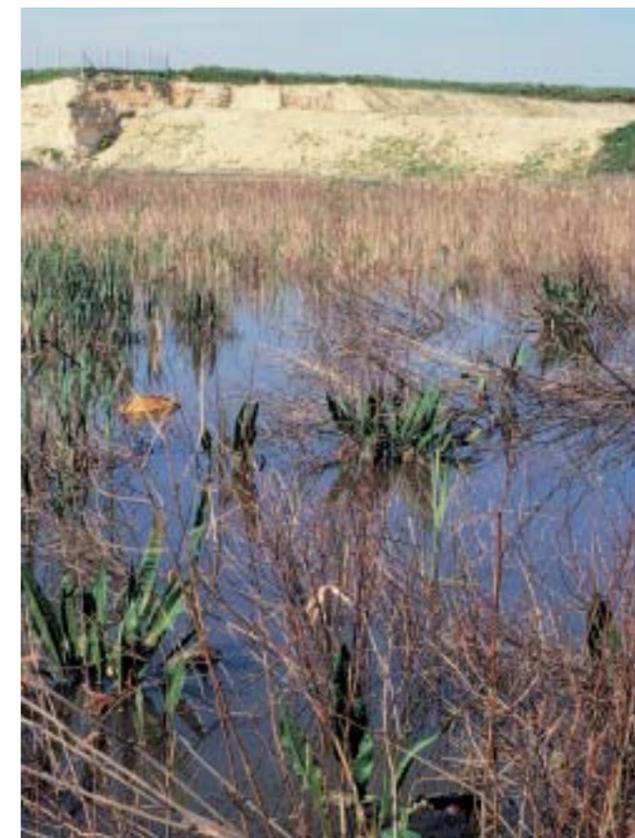
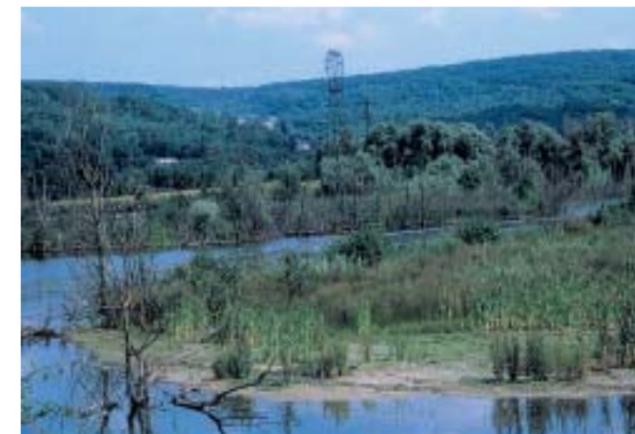


Qu'est-ce qu'une zone humide ?

La "Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau" plus couramment appelée Convention de Ramsar, du nom de la ville d'Iran où elle a été signée en 1971 est un traité intergouvernemental. Dans ses textes, est proposée la définition suivante pour le terme "zone humide" : "Les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée,

y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas 6 mètres". Il s'agit d'une définition extensive, groupant sous la même bannière, tant les milieux aquatiques courants ou stagnants, que les différents types de zones palustres. En France, la "Loi sur l'Eau" de 1992 est plus restrictive : "terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire". Les termes de "terrains", "inondés ou engorgés" semblent laisser supposer qu'il ne s'agit pas de plans d'eau ou du moins seulement de plans d'eau peu profonds.

De manière pratique, on distinguera bien les zones humides des milieux aquatiques. On considérera qu'une zone humide est une "zone de terre dont les caractéristiques sont déterminées par la présence d'eau, qu'elle inonde le sol de manière permanente ou de manière intermittente, en général saisonnière. En cas d'inondation permanente, la profondeur doit permettre le développement de macrophytes enracinés". Par contraste, le milieu aquatique sera défini comme la zone en eau où les macrophytes enracinés ne peuvent plus prendre pied (soit environ à partir d'une profondeur de 2 mètres).



des fins agricoles ou sylvicoles, et le processus se poursuit. En France, le phénomène a continué à s'accélérer jusqu'en 1992. Cet effondrement des zones humides a mis en lumière leur rôle essentiel dans le cycle de l'eau, leur grande richesse faunistique et floristique et les services qu'elles rendent à la collectivité. Leur restauration sera longue et coûteuse ; certaines destructions sont irréversibles, du moins à l'échelle humaine. C'est dans cette perspective que les zones humides conçues artificiellement prennent tout leur intérêt et que les carrières en eau constituent une occasion inestimable de créer de nouvelles zones humides. Il ne s'agit pas de se substituer aux zones humides naturelles ou semi-naturelles, mais d'en être complémentaires. D'ailleurs, les carrières en eau, sauf quelques très grands secteurs d'exploitation des sables et graviers alluvionnaires, resteront toujours des zones humides de taille modeste.

Rôle fonctionnel et soutien de la biodiversité

L'objectif premier de l'aménagement écologique des carrières en eau est donc de donner à ces sites industriels un rôle de zone humide. Ce

rôle présente d'abord un aspect fonctionnel, c'est-à-dire que la conception de l'aménagement ne peut ignorer les processus écologiques globaux : par exemple, la dynamique fluviale intégrant les phénomènes de crue, de battance et d'écoulement de la nappe, de sédimentation et d'érosion... Une gravière devra être positionnée dans ce système hydrofluvial où elle pourra par exemple comme une annexe fluviale jouer différents rôles : écrêtage des crues, piégeage des sédiments et des polluants, distribution des eaux superficielles ou souterraines vers la plaine, etc.

Par ailleurs, il y a le rôle envisagé sous l'aspect du monde vivant : la régression massive des zones humides a eu pour conséquence directe de précariser la plupart des espèces attachées à ces milieux. Devant cette fragilité, les biotopes d'origine artificielle sont les bienvenus : ils permettent de redonner une certaine densité à un réseau distendu de milieux humides. Des études récentes ont montré que les gravières jouaient un rôle de soutien important, parfois essentiel pour des espèces paludicoles ou aquatiques. On trouvera tout au long de ce guide une approche mixte ne négligeant ni les aspects fonctionnels des écosystèmes, ni leur valeur pour la préservation des espèces. ■

1

1.1	QUELQUES NOTIONS D'ÉCOLOGIE UTILES À L'AMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES	10
1.2	LES CONSÉQUENCES PHYSIQUES DE L'EXPLOITATION D'UNE CARRIÈRE	17
1.3	LA STRATIFICATION VERTICALE ET LE ZONAGE HORIZONTAL	18
1.4	QUELQUES GROUPES DE PLANTES CARACTÉRISTIQUES DES CARRIÈRES EN EAU	21
1.5	LES PRINCIPAUX GROUPES D'ANIMAUX DES CARRIÈRES EN EAU	25

Écologie des carrières en eau

Les carrières en eau ne constituent pas en tant que telles un type précis d'écosystème. Elles sont trop diverses pour cela. Cependant, l'exploitation des granulats entraîne des modifications du milieu : ces modifications créent des habitats particuliers et ont une influence importante sur le fonctionnement des écosystèmes concernés, quelle que soit l'échelle à laquelle on considère ceux-ci. Afin d'éclairer le lecteur sur la nature des écosystèmes issus de l'exploitation des carrières, on présentera :

1. quelques **notions d'écologie classiques en réaménagement écologique**.
2. les conséquences de l'exploitation, en particulier en ce qui concerne les sols, les caractéristiques topographiques et les phénomènes hydriques.
3. **la stratification verticale** des plans d'eau.
4. le **zonage horizontal** au niveau des berges.
5. **les principaux groupes de végétaux et d'animaux vertébrés** utilisant les carrières en eau ; on entend par *groupe* des espèces exploitant le même type d'habitat.

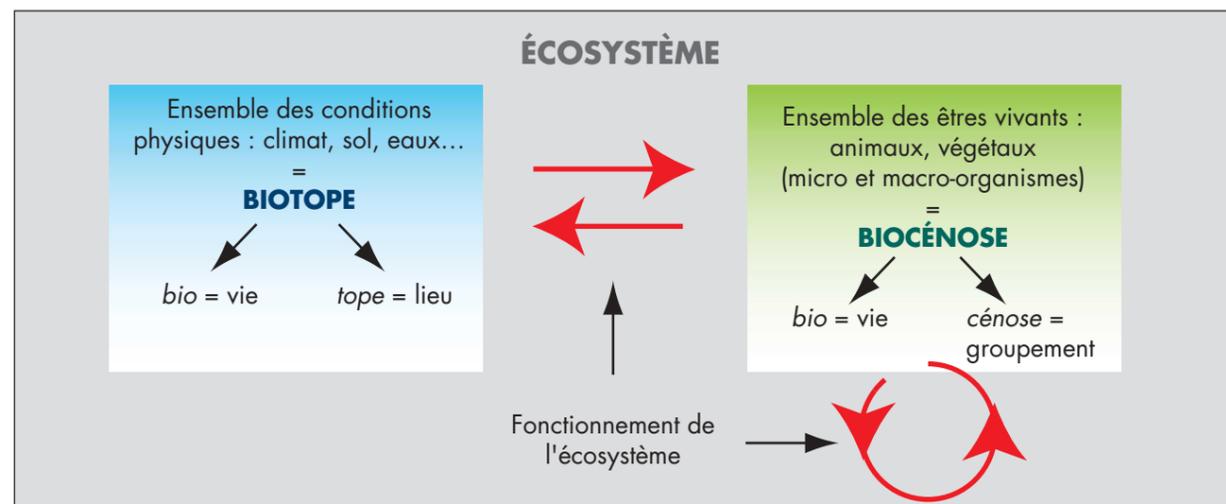
L'utilisation pragmatique du concept d'écosystème en écologie appliquée

En écologie de terrain, on abordera concrètement la description et la compréhension des milieux naturels en deux étapes :

1- Les inventaires de faune et de flore et la définition des milieux selon leurs principales caractéristiques (substrat, humidité, pH, niveau trophique, topographie, type de végétation...) permettent de mettre en évidence des habitats, en utilisant la notion évoquée ci-dessus de groupe écologique ;

2- On cherche ensuite à définir les relations qui existent entre les différents habitats ; on passe alors à une compréhension du fonctionnement de l'écosystème. Les habitats fortement liés entre eux (1) au niveau physique par des facteurs comparables et de même origine, (2) au niveau des espèces qui les exploitent par des relations d'interdépendance, de complémentarité, de solidarité... ont alors les conditions requises pour former ensemble un écosystème.

FIG. 1.- Définition de l'écosystème et de son fonctionnement.



1.1- Quelques notions d'écologie utiles à l'aménagement écologique des carrières

Un projet d'aménagement *écologique* a pour ambition une mise en valeur du patrimoine naturel : milieux, espèces, bon fonctionnement des écosystèmes. Mais il n'est pas a priori évident de décréter ce qu'est un *objectif écologique* pour un site donné. Ce n'est qu'après réflexion et à l'issue de choix stratégiques que l'on peut y parvenir. Or, ce processus met en jeu de nombreuses notions écologiques. Nous présentons ici les plus utiles en matière d'aménagement, afin d'aider l'utilisateur de ce guide à cerner ce que peut être un objectif écologique qui soit en même temps efficace et réaliste.

1.1.1. QU'EST-CE QU'UN ÉCOSYSTÈME ?

L'écosystème, un concept dynamique

La théorie écologique dit que l'*écosystème* est l'addition d'un milieu de vie physique ou *biotope* et de l'ensemble des êtres vivants qui s'y développent ou *biocénose*. On doit ajouter que la *notion d'écosystème est dynamique* : décrire un écosystème ne consiste pas seulement à faire la liste de ses caractéristiques physiques et des êtres vivants qui le composent mais à étudier leurs interactions. Ces interactions constituent ce qu'on nomme le *fonctionnement de l'écosystème*.

Les paramètres physiques ou biotope

Il y a une multitude de paramètres physiques permettant de caractériser un milieu de vie. Il s'agit principalement d'éléments climatiques (températures, précipitations, ensoleillement, vent, etc.) et d'éléments propres au substrat (pH⁽¹⁾, alimentation hydrique, texture, struc-

ture⁽²⁾, richesse nutritive, composition minérale, etc.). Comme on ne trouve jamais dans la nature deux endroits ayant exactement les mêmes caractéristiques, on se contente en pratique de conditions approximativement homogènes.

L'écosystème est donc un concept souple qui dépend de la manière et de la précision avec lesquelles on définit le biotope. Ceci explique pourquoi on trouve dans la littérature écologique des écosystèmes d'échelles très variables : de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés. Ils peuvent d'ailleurs s'emboîter les uns dans les autres : un écosystème défini de manière assez large (une grande zone humide par exemple) peut être décomposé en écosystèmes plus petits (étang, prairie humide, bois humide...).

Les habitats ou milieux de vie d'une espèce

La manière dont les espèces utilisent le milieu naturel guide les écologues dans la reconnaissance *in situ* des écosystèmes. Les lieux dont les ressources sont utilisées par un être vivant à un moment quelconque de son existence (reproduction, recherche alimentaire, mue, etc.) prennent le nom *d'habitats de l'espèce* ou *milieux de vie*. Ils sont constitués de son biotope, mais aussi d'autres êtres vivants qui servent de support à son cycle biologique. Par exemple, l'arbre dans lequel niche un oiseau appartient à son milieu de vie.

En pratique, la plupart des espèces possèdent un habitat principal. Pour les espèces animales, c'est celui où elles se reproduisent, pour les espèces végétales, celui où elles croissent. Bien que deux espèces n'aient jamais exactement le même habitat, on parvient à définir des ensembles d'espèces ou *groupes écologiques*, qui exploitent à peu près le même habitat. Cette notion de groupe écologique aide à définir les écosystèmes sur le terrain.

1.1.2. LA BIODIVERSITÉ

Le terme de *biodiversité* – ou « diversité biologique » – a élargi son audience depuis la *Conférence Internationale de Rio* qui lui a été consacré en 1992. Il a d'ailleurs été incorporé dans les législations européenne et française. La biodiversité n'est rien d'autre que l'ensemble des espèces vivant sur la planète. Ce qui fait son actualité, c'est la rapidité avec laquelle le nombre de ces espèces décroît depuis les débuts de l'ère industrielle et plus particulièrement depuis quelques décennies. Le taux de disparition serait à l'heure actuelle de 1 % à 11 % par décennie⁽³⁾ et en augmentation régulière. Cette décroissance est d'ailleurs plus particulièrement préoccupante dans le cas des zones humides.

Le terme de *biodiversité* s'applique à l'échelle planétaire, mais aussi à n'importe quel autre niveau – un continent, un pays, une région, un terroir, etc. – et même à un site d'étude précis. Quelle que soit l'échelle, la biodiversité a deux composantes : d'une part la diversité des espèces vivantes (diversité génétique), d'autre part la diversité des habitats et paysages (diversité écologique).

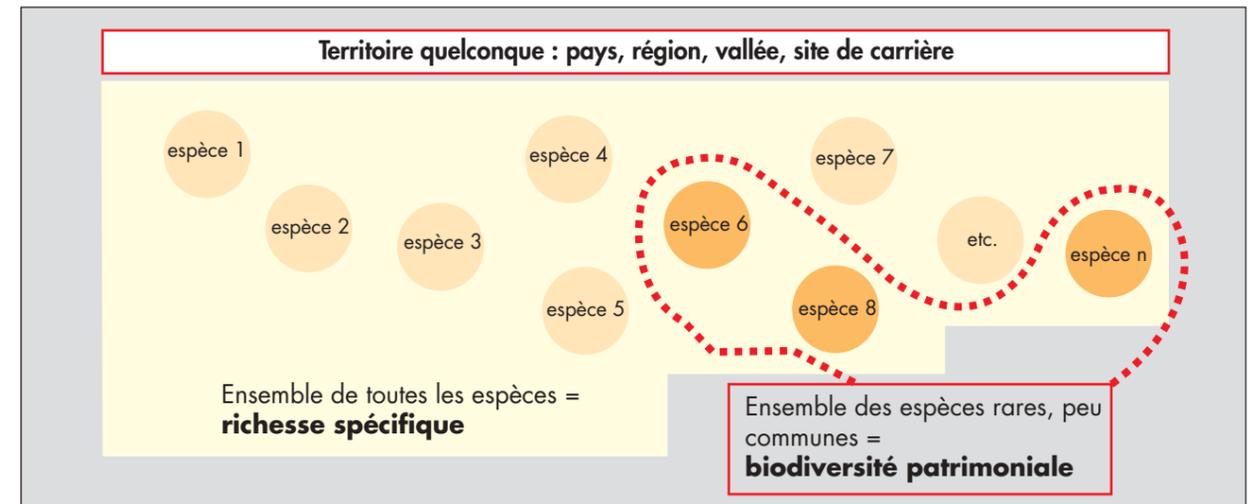
Richesse spécifique et biodiversité patrimoniale

Le patrimoine biologique d'une zone quelconque est constitué de l'ensemble des espèces qui y vivent. Bien sûr, plus elles sont nombreuses, plus ce patrimoine est riche. Le nombre d'espèces vivant dans un territoire donné est appelé *richesse spécifique* de ce territoire. Mais parmi toutes les espèces, il y a des espèces considérées comme remarquables parce que plus rares et/ou plus menacées que d'autres. On appelle *biodiversité patrimoniale*, la quantité de ces espèces fragiles qu'un milieu abrite. La préservation sur un lieu donné consiste bien plus souvent à aider les espèces menacées et à protéger leurs habitats, qu'à rechercher un record dans le nombre total d'espèces.

(1) (2) Voir lexique.

(3) GROOMBRIDGE B. (Ed.) 1992.- *Global biodiversity. Status of the Earth's living resources*. World Conservation Monitoring Center.

FIG. 2.- Différence entre la **richesse spécifique** et la **biodiversité patrimoniale**.



Comment définir la biodiversité d'un territoire ?

Parce qu'on est contraint de fixer des priorités pour prendre des décisions, on est amené à évaluer ou en tout cas à estimer la biodiversité à des échelles diverses. En théorie, il faudrait mesurer la part prise par le territoire concerné dans la biodiversité planétaire, ce qui est hors d'atteinte.

En premier lieu, il est impossible de recenser toutes les espèces. On utilise donc des groupes qui ont en même temps l'avantage d'être de bons indicateurs de la qualité des milieux, d'être bien connus et d'être relativement faciles à observer. À l'heure actuelle, les groupes les plus étudiés sont les végétaux vasculaires (plantes à graines, fougères et groupes voisins) et les vertébrés (oiseaux en particulier). Les informations sont de plus en plus souvent complétées avec des données sur certains ordres d'insectes comme les libellules (Odonates), les papillons (Lépidoptères), les criquets et sauterelles (Orthoptères), etc.

En second lieu, la biodiversité du territoire concerné est comparée avec celle des territoires plus grands dans lesquels il s'insère. Pour des raisons pratiques, on est bien souvent obligé de tenir compte des frontières politiques, bien qu'elles n'aient pas de signification écologique. C'est ainsi que pour un site précis, on fait par exemple référence dans l'étude de sa biodiversité, 1°) au territoire de l'Union Européenne, 2°) à celui du territoire français, 3°) à celui de la région administrative.

1.1.3. LA PRODUCTIVITÉ DES ÉCOSYSTÈMES

Définitions

La *productivité* d'un écosystème est la quantité de matière organique ou *biomasse* fournie par les végétaux à toute la chaîne alimentaire. Cette productivité est très variable. Certaines

La Productivité des substrats utilisés pour l'aménagement des carrières en eau

1 – Les trois couches de terrain se classent le plus souvent ainsi, de la plus productive à la moins productive : terre végétale → stériles → gisement exploitable.

2 – Le remaniement des terres stimule systématiquement l'activité biologique des substrats ; donc un sol paraissant peu productif avant décapage peut le devenir après décapage.

3 – Les terres végétales sont souvent très productives et chargées en nitrates s'il s'agit d'anciennes terres cultivées.

4 – Les terres de zones humides piègent de grandes quantités de nutriments (en particulier nitrates et phosphates) : elles deviennent très productives quand elles ont été décapées puis disposées en merlons (elles libèrent les nutriments).

■ les milieux productifs

(terre végétale...) favorisent la biomasse et la richesse spécifique (le plus souvent avec des espèces végétales banales) : **beaucoup d'espèces mais peu d'espèces rares.**

■ les milieux peu productifs

(sols pauvres...) favorisent la biodiversité patrimoniale, en particulier l'implantation d'espèces végétales rares : **peu d'espèces mais beaucoup d'espèces rares.**

Photo 4. Ce document montre nettement la différence entre un milieu productif ou eutrophe (coulée de terres argilo-limoneuses au centre, recouverte de végétation dense) et un milieu pauvre ou oligotrophe (sables siliceux supportant une végétation basse et éparse) (Ph. Dasnias).

(4) Voir lexique.

zones humides, par exemple, font partie des milieux les plus productifs en biomasse. En effet, la productivité dépend de multiples facteurs. Deux d'entre eux sont particulièrement importants et sont essentiels dans le cadre des aménagements écologiques de carrières :

- le pH du substrat (acide, neutre, basique) qui dépend en très grande partie de la présence de calcaire et de potasse ; les sols carencés dans ces minéraux sont acides et peu productifs ;
- la disponibilité en éléments nutritifs, les deux principaux étant l'azote (sous forme de nitrates en particulier) et le phosphore. La structure et la texture du sol, le climat local, l'humidité du substrat, etc. jouent aussi leur rôle. Pour simplifier, on distinguera des milieux peu productifs ou *oligotrophes* et des milieux moyennement à très productifs, qualifiés respectivement de *mésotrophes* et *eutrophes*.

Les plans d'eau de gravières sont généralement mésotrophes juste après l'exploitation (mise à nu de la nappe). On peut assister ensuite à une augmentation de la richesse trophique⁽⁴⁾ du fait de l'intensification des processus biologiques. Cependant, à terme, on observe assez fréquemment une baisse.

Relations entre la productivité et la biodiversité

La recherche de la productivité d'un écosystème n'est pas une fin en soi en écologie. Bien sûr pour des raisons diverses (reverdissement rapide, volonté d'attirer un maximum d'espèces ou d'individus) on peut avoir envie de recher



cher cette productivité. Par exemple la terre végétale, substrat riche, est régénérée sur tous les sols pour qu'ils se végétalisent rapidement. Mais il faut savoir que de nombreuses espèces d'intérêt patrimonial vivent dans des milieux contraignants peu productifs.

1.1.4. LE DEVENIR DES ÉCOSYSTÈMES : SUCCESSIONS, PERTURBATIONS

Les écosystèmes évoluent inéluctablement dans le temps. Vis-à-vis de ces processus, deux notions méritent d'être présentées : les successions d'une part qui correspondent à l'évolution naturelle, les perturbations d'autre part qui la contrarient.

les successions

A priori, la succession définit la série de phases par lesquelles passe naturellement un écosystème. Chacun en a l'expérience : un espace dénudé laissé à l'abandon évolue spontanément. La végétation change, la structure se complique avec l'apparition successive de plusieurs strates de végétation : mousses, petites herbes, hautes herbes, arbustes, arbres. Les communautés animales se modifient sous l'effet des changements d'habitats. En retour, les conditions physiques sont modifiées par les écosystèmes : apparition sur le sol d'une litière végétale puis d'une couche d'humus, diminution du rayonnement solaire au sol, réduction des variations de température... et lente évolution du sol.

Si le départ de la succession est un sol nu, on parle de **succession primaire** : sur carrières, c'est par exemple le cas des alluvions remblayées ou non, ou des terres végétales régénérées. Le premier stade



Photo 5. Les différents stades d'une succession végétale au bord d'un bassin de décantation de gravière : au premier plan à droite, le stade pionnier initial où le substrat est encore largement apparent, au premier plan au centre et à gauche, un tapis végétal dominé par des espèces annuelles (on reconnaît la Patience maritime de couleur brune) ; au second plan, un stade herbacé plus haut avec des héliophytes, massettes à droite et salicaires (plantes roses) à gauche. Les stades initiaux sont maintenus par la montée saisonnière des eaux sur le bassin. Le stade arbustif est représenté par des saules blancs et des saules des vanniers, dans une zone qui n'est pas assez inondée pour que leur progression soit empêchée. À l'arrière-plan se trouve la chênaie sur sables qui correspond au climax local, c'est-à-dire au dernier stade de la succession végétale sur ce type d'alluvions anciennes (Ph. Dasnias).

Le rôle des crues exceptionnelles dans les plaines alluviales

Si les crues régulières constituent un événement prévisible dans les plaines inondables, il n'en va pas de même des crues exceptionnelles. Des études récentes montrent l'importance de ces perturbations hydrologiques dans le fonctionnement et la structure des écosystèmes alluviaux. Sans entrer dans le détail, on comprendra ceci à l'aide de deux exemples :

1 - dans les annexes fluviales (bras morts ou secondaires, chenaux, noues,

mares...), les inondations apportent régulièrement des éléments nutritifs qui sont transformés en biomasse ; les crues plus fortes permettent l'exportation de cette biomasse et le "curage" du fond qui sinon a tendance à se colmater par sédimentation ;

2 - les groupements végétaux laissés à eux-mêmes évoluent inéluctablement vers des boisements, ce qui uniformise le milieu ; on constate que dans les plaines alluviales où la dynamique fluviale fonctionne, la végétation forme une mosaïque de tous les stades possibles, des petites

herbes des grèves argileuses ou sablo-graveleuses aux forêts alluviales ; or, seules les crues fortes possèdent une énergie suffisante pour rajeunir périodiquement les habitats et donc permettre à long terme le maintien des espèces pionnières. Ce "fonctionnement par pulsations" suppose que le cours d'eau dispose encore d'un fuseau de liberté, ce qui est rarement le cas et qui est difficile à rétablir. Cependant, on peut réutiliser d'anciennes gravières pour restaurer localement une zone de liberté permettant au cours d'eau de dépenser son énergie.

d'une succession primaire est appelé **stade pionnier** ; généralement, il est de courte durée. Si au contraire, on a au départ un espace déjà végétalisé, le terme de **succession secondaire** est employé : évolution d'une prairie abandonnée par exemple. Sous l'effet de conditions naturelles (animaux, inondations...) ou humaines (entretien...), l'évolution normale de la succession peut être ralentie ou arrêtée à un certain stade. Par exemple, une grève d'étang régulièrement inondée pourra se maintenir longtemps au stade pionnier, une prairie fauchée annuellement n'évoluera pas vers un fourré arbustif... Une perturbation, naturelle ou humaine, peut même ramener le milieu à un stade antérieur. Dans ce cas, on emploie le terme de **succession régressive**. Ainsi, la crue exceptionnelle d'un cours d'eau rajeunit de nombreux milieux alluviaux.

Les perturbations et leur rôle écologique

On considère aujourd'hui que les perturbations sont (dans certaines limites) une condition indispensable à l'existence des écosystèmes et à la préservation de la biodiversité. Ceci est très important dans le cas des exploitations de carrières qui ont été beaucoup critiquées pour les côtés négatifs des perturbations qu'elles induisent. Or on s'aperçoit que l'on peut aussi profiter des aspects écologiquement positifs de ces perturbations.

Les perturbations (crues, incendies limités, éboulements, glissements de terrain, chablis...) entretiennent une mosaïque de milieux, sans remettre en cause l'écosystème dans son ensemble. Elles se distinguent en ceci des catastrophes

(forte éruption volcanique, pollutions, incendies répétés...) ou des évolutions traumatiques (désertification, déforestation massive, assèchement, eutrophisation...) qui n'entretiennent pas la structure en mosaïque de l'écosystème mais le simplifie radicalement. Les perturbations sont indispensables pour entretenir toute la gamme des habitats : pionniers → post-pionniers → intermédiaires → matures → climaciques.

1.1.5. QUELQUES ÉLÉMENTS D'ÉCOLOGIE DU PAYSAGE

Les écosystèmes se répartissent dans l'espace, constituant des paysages ou écomplexes. L'écologie du paysage cherche à comprendre les effets de cette « géographie » des milieux.

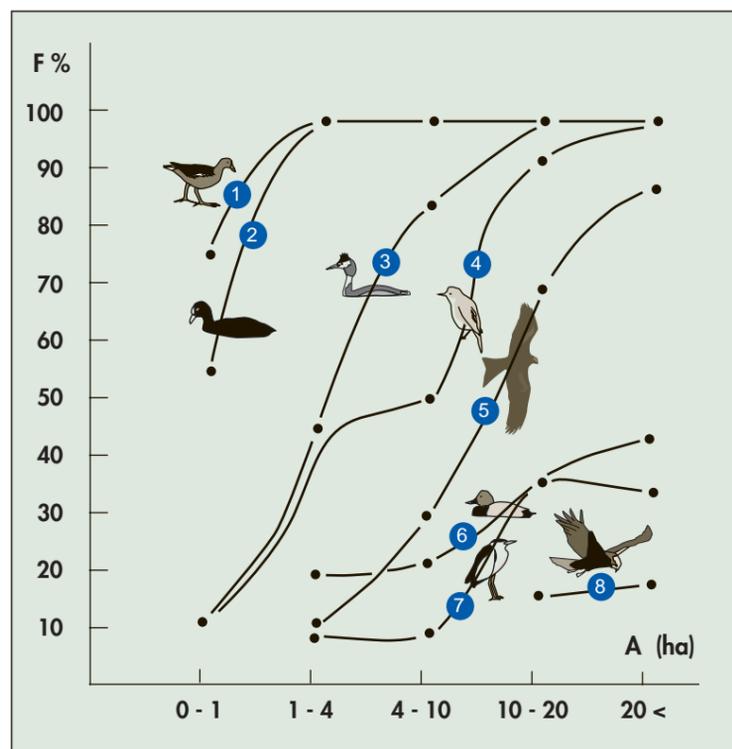
La taille d'un milieu

A priori, il existe des écosystèmes de toutes tailles. Cependant les écosystèmes n'atteignent leur intérêt écologique optimal qu'à partir d'une certaine **superficie critique**. Celle-ci correspond aux exigences territoriales les plus fortes parmi les espèces vivant dans ce milieu. Par exemple la composition en oiseaux des phragmitaies⁽⁵⁾ dépend de la superficie : avec moins d'un ha on aura différents petits passereaux de marais, mais il faudra bien un ha pour voir nicher la Rousserolle turdoïde et au moins 15 à 20 ha pour le Butor étoilé. Or, assez logiquement, les espèces les plus exigeantes sont aussi les espèces les plus rares.

FIG. 3.- Fréquence (F %) de 8 espèces d'oiseaux aquatiques en fonction de la surface (A) des étangs en plaine de Saône.

[d'après ROCHÉ J., 1982 - Structure de l'avifaune des étangs de la plaine de Saône : influence de la superficie et de la diversité végétale. *Alauda*, 50 (3) : 193-215].

- 1 Poule d'eau
- 2 Foulque macroule
- 3 Grèbe huppé
- 4 Rousserolle effarvatte
- 5 Milan noir
- 6 Fuligule milouin
- 7 Blongios nain
- 8 Busard des roseaux



Sur un site donné de carrière à aménager, dont la superficie est limitée par définition, ceci a pour conséquence que si l'on souhaite développer un milieu jusqu'à son intérêt optimal, ceci se fera au détriment des autres milieux. On se trouvera confronté à un choix : les efforts faits pour une ou quelques espèces risquent de nuire à la richesse spécifique (= nombre total d'espèces).

Effet de lisière et écotone

Une autre notion à évoquer quant à l'insertion d'un milieu dans son environnement réside dans les effets de lisière avec les milieux adjacents. Ils sont souvent positifs parce qu'ils créent des milieux intermédiaires ou **écotones** dont l'intérêt est fréquemment souligné : dans de nombreux cas, ces écotones sont plus riches que leurs deux « parents » réunis.

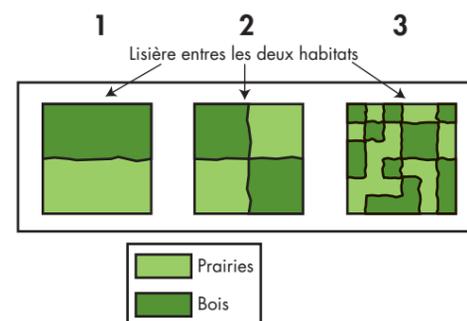


FIG. 4.- Accroissement du linéaire de lisière (= écotone) entre deux habitats, sans modification de superficie, par modification de l'organisation de l'espace : exemple de bois et de prairies.

La complémentarité des milieux

Tout milieu s'intègre à une mosaïque d'autres milieux, le fonctionnement global de la mosaïque étant extrêmement complexe. Cependant, on retiendra qu'il existe une certaine complémentarité des milieux vis-à-vis du monde animal. De nombreuses espèces nécessitent deux ou plusieurs habitats (les rapaces par exemple, qui se nourrissent dans certains milieux et nichent dans d'autres).

Isolats et connectivité

Les effets de l'isolement d'un type de milieu par rapport à ses semblables sont négatifs sur sa valeur. En effet, les espèces présentent des capacités de dissémination diverses et certaines ne se

⁽⁵⁾ Voir lexique.



PLANCHE I. (M. COURCOUX).- Cette représentation d'un aménagement de roselière au fond d'un plan d'eau de gravière permet d'illustrer quelques notions de l'écologie du paysage (voir les explications dans le texte).

- 1 - la roselière couvre une superficie assez importante pour pouvoir accueillir des oiseaux exigeants qui nichent dans ce milieu quand il atteint une taille critique (Rousserolle turdoïde, Blongios nain...).
- 2 - la lisière (= écotone) entre la roselière et le milieu aquatique a été maximisée en créant au sein de la roselière des clairières aquatiques et des chenaux.
- 3 - la juxtaposition à la roselière de milieux complémentaires (milieu aquatique, boisements...) augmente son efficacité écologique.
- 4 - le petit plan d'eau situé au premier plan est connecté au grand plan d'eau par l'intermédiaire d'un chenal.

propagent qu'à de faibles distances. Un milieu isolé ou **isolat**, surtout de faible superficie, est toujours plus pauvre que le même milieu appartenant à un réseau. Pour des raisons de dispersion des espèces également, mais aussi pour permettre le cheminement de certaines espèces terrestres ou aquatiques, des liaisons linéaires entre différents noyaux accroissent la capacité d'accueil de l'ensemble du réseau : c'est ce qu'on dénomme la **connectivité des milieux**. Ce phénomène peut-être illustré par l'exemple des haies reliant des bois entre eux ou celui des fossés connectés à des étangs.

1.1.6. L'HYDROSYSTÈME ALLUVIAL⁽⁶⁾

Les carrières en eau se trouvent le plus souvent dans le lit majeur (= plaine d'inondation). C'est pourquoi, il convient de présenter ici quelques éléments de compréhension de l'hydrosystème alluvial. Les milieux naturels (forêt alluviale, marais, annexes hydrauliques...) à semi-naturels (prairies, bocage humide, peupleraies non intensives...) présents dans une plaine

alluviale dépendent tous du fonctionnement global de celle-ci. En effet, en termes écologiques, le lit mineur ne peut être dissocié de sa plaine alluviale, la circulation de l'eau étant logiquement le paramètre clef pour la compréhension des phénomènes.

Des connexions hydriques dans les trois dimensions de l'espace

De manière pratique, on peut décrire l'écosystème d'une plaine alluviale (= hydrosystème alluvial) selon les trois axes de connexion que permet la circulation permanente ou temporaire de l'eau :

1. L'axe longitudinal (amont ↔ aval)

Il permet de décrire une zone amont d'érosion, une zone intermédiaire de transfert des sédiments, une zone aval de dépôt des sédiments ; à ces zones correspondent des écosystèmes différents. Cet axe est essentiel pour la dissémination de nombreux organismes et l'on n'oubliera pas en particulier qu'il est parcouru par des poissons migrateurs (Salmonidés⁽⁷⁾ en particulier).

⁽⁶⁾ Source : AMOROS C. & PETTS G.E. - *Hydrosystèmes fluviaux*. 1993 - Masson (coll. d'écologie).

⁽⁷⁾ Voir lexique.

2. L'axe latéral (lit mineur ↔ plaine d'inondation)

Le lit mineur entretient normalement des échanges avec sa plaine d'inondation. Ces échanges peuvent être permanents avec les annexes fluviales connectées au cours d'eau ou bien n'intervenir qu'au moment des crues. D'un côté le cours d'eau fournit la recharge sédimentaire, les éléments minéraux ou les propagules⁽⁸⁾ végétales ; de l'autre, les zones humides restituent les matières organiques et éléments nutritifs qu'elles ont accumulés. Cette connectivité latérale, souvent entravée sur les cours d'eau actuels endigués et corsetés, est indispensable au maintien des milieux naturels de la plaine et à la biologie de nombreuses espèces : citons par exemple le brochet qui fraie dans les prairies inondées.

3. L'axe vertical (surface ↔ sous-sol)

Les échanges entre les lits mineur et majeur d'une part, et la nappe d'autre part, participent à l'écologie d'une plaine alluviale. Là encore, la connectivité est essentielle : d'une part les écosystèmes souterrains interstitiels dépendent des apports en matières organiques venus de la surface, d'autre part de nombreux milieux aquatiques ou humides sont liés à une alimentation par la nappe. A cet égard, le colmatage du fond d'un plan d'eau, l'isolant de l'aquifère, entraîne une dégradation par déficit en oxygène et eutrophisation.

⁽⁸⁾ Voir lexique.

⁽⁹⁾ Les effets morphodynamiques correspondent à des modifications morphologiques des berges, du lit, etc. sous l'effet dynamique de l'eau.

la dimension temporelle de l'hydrosystème alluvial

Le temps est également une dimension à prendre en compte dans la compréhension de l'éco-complexe alluvial. Il entre en ligne de compte dans les phénomènes suivants :

⇒ **Périodicité des crues** : on peut distinguer une composante prévisible (les statistiques permettent de savoir que les crues reviennent statistiquement avec telle amplitude moyenne et à telle saison) et une composante aléatoire (impossibilité de prévoir la crue pour un moment donné).

⇒ **Phénomènes de succession** : comme on l'a vu tout milieu non perturbé évolue inéluctablement avec le temps ; le stade terminal est par exemple la forêt alluviale ; mais les perturbations induisent des retours en arrière, des rajeunissements, suivis d'une reprise de l'évolution.

⇒ **À une échelle de temps plus longue** (quelques décennies à plusieurs siècles), l'hydrosystème alluvial se modifie sous l'effet d'altérations diverses (modification du régime des crues, changements climatiques, accélération des écoulements dans l'ensemble du bassin versant, pollution des eaux...) : les réponses se traduisent en termes physiques (hydrauliques, morphodynamiques⁽⁹⁾, érosion /

⁽¹⁰⁾ une chênaie-ormie est une forêt dominée par des chênes et des ormes, une chênaie-frênaie par des chênes et des frênes... Un boisement alluvial est un boisement qui se développe sur les alluvions d'un cours d'eau, en conditions de plus ou moins grande humidité.

sédimentation...) puis s'inscrivent dans la végétation et les biocénoses (par exemple : lent passage de la chênaie-ormie alluviale à une chênaie-frênaie alluviale puis à une chênaie-charmaie non alluviale⁽¹⁰⁾, colmatage et déconnexion des annexes hydrauliques entraînant un appauvrissement des peuplements de poissons sur l'ensemble du cours d'eau, disparition d'espèces emblématiques comme la loutre, le castor, le saumon...).

LES ANNEXES FLUVIALES : des milieux qui servent de modèles dans les aménagements de carrières en eau

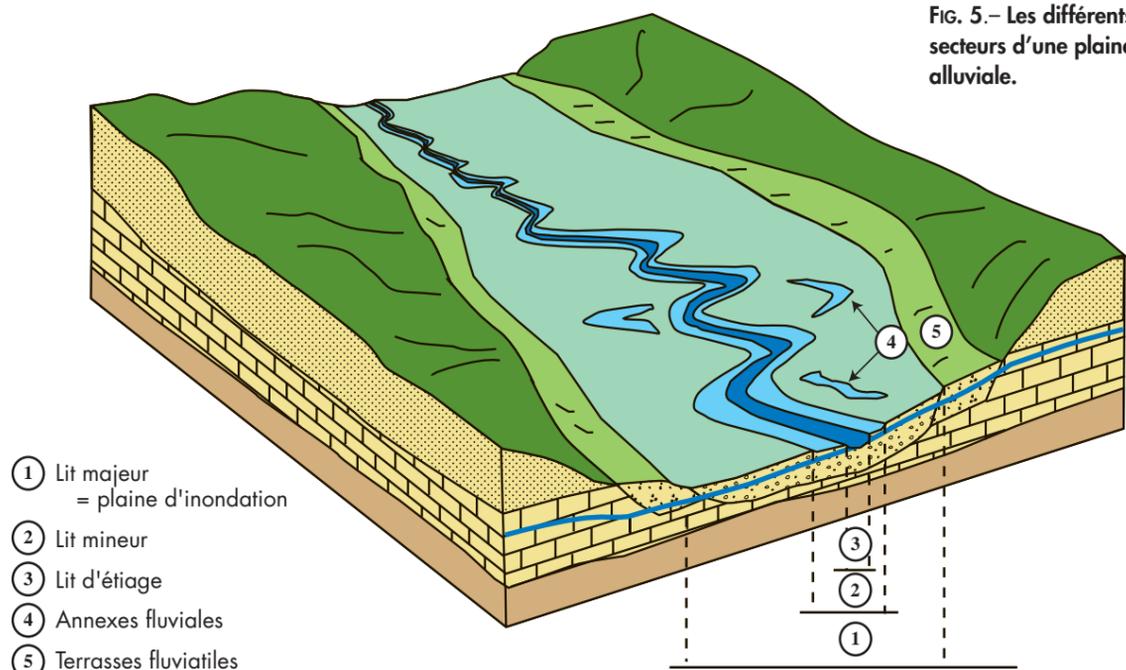


Photo 6. Un bras secondaire de la Loire ; la dynamique fluviale et les crues rajeunissent régulièrement les habitats, entretenant des milieux minéraux ou des grèves peu végétalisées. En mettant à jour les alluvions, une gravière mime cette dynamique et crée des milieux analogues. Cependant ceux-ci doivent être entretenus pour perdurer (inondations, entretien approprié...) (M. Pajard).



Photo 7. Un chenal d'écoulement des crues dans la moyenne vallée inondable de l'Oise (= noue). Ce type d'habitat forme un réseau qui répartit les eaux dans la plaine et entretient des milieux aquatiques stagnants peu profonds et des milieux à exondation tardive au sein des prairies. Les aménagements de gravières peuvent partiellement pallier la régression actuelle de ces habitats (M. Thauront).

FIG. 5. Les différents secteurs d'une plaine alluviale.



- ① Lit majeur = plaine d'inondation
- ② Lit mineur
- ③ Lit d'étiage
- ④ Annexes fluviales
- ⑤ Terrasses fluviales

1.2. Les conséquences physiques de l'exploitation d'une carrière

Un site de carrière en cours d'exploitation est un site perturbé en permanence : décapage de la terre végétale, extraction des matériaux, circulation des engins de chantier, etc. Par ailleurs, à l'exception des zones de stockage contenant de la terre végétale, les substrats mis à jour (nappe phréatique, sables et graviers, terres tassées) sont au départ peu fertiles car pauvres en éléments nutritifs et dénués des microstructures propres à un sol en place. Ces conditions sont défavorables à la vie. Cependant l'exploitation progresse par phases successives. Sur les zones déjà exploitées on n'intervient plus que pour les travaux de remise en état, qui avancent en concomitance avec l'extraction : c'est ce qu'on appelle la *remise en état coordonnée*. Même en l'absence de remise en état, la cessation des perturbations permet une recolonisation spontanée des sols. Il n'y a donc jamais « stérilisation » simultanée de l'ensemble du site.

Ces perturbations initiales existent et l'on ne doit pas les négliger surtout quand il s'agit d'exploiter des habitats sensibles. Ceci dit, les milieux issus de l'exploitation des carrières en eau présentent des caractéristiques originales, qui peuvent être autant d'opportunités pour des aménagements à vocation écologique.

Quelles sont donc ces caractéristiques propres au milieu « carrière en eau » après exploitation ? Elles peuvent être classées en trois principales catégories :

- 1) des conséquences liées à l'apparition de plans d'eau,
- 2) des conséquences liées aux modifications de la topographie,
- 3) des conséquences liées à la mise à jour de couches de roches et substrats souterrains.

Caractéristiques hydriques

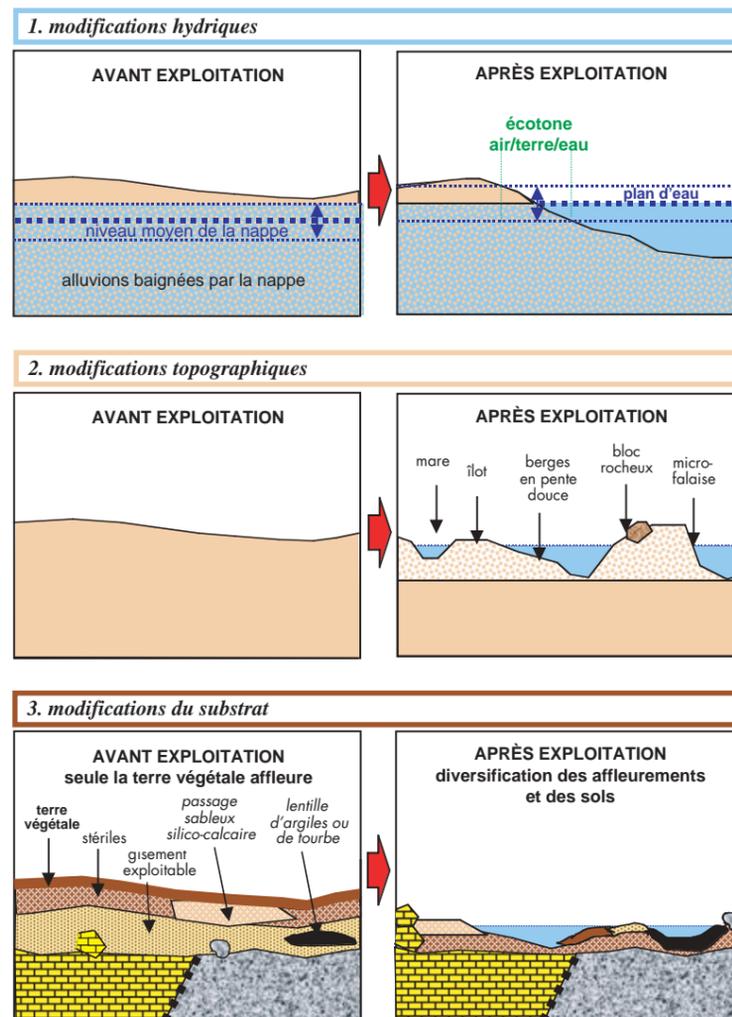
Les gravières situées en lit majeur font apparaître la nappe. Les eaux ainsi mises à nu sont souvent de bonne qualité ; en particulier, elles sont rarement eutrophes. Au cours des ans, l'isolement hydrique de la gravière par colmatage du fond et des berges peut influencer négativement sur la qualité des eaux de la gravière. Mais si l'on évite une pollution externe (nitrates en particulier), les plans d'eau peuvent conserver des eaux de bonne qualité. Plusieurs études ont montré que les processus de dénitrification (réduction des nitrates en azote minéral) qui prennent place dans les sédiments du fond, très appauvris en oxygène, tendent à faire diminuer la charge en nitrates des eaux de gravière.

En dehors du cas des gravières baignées par la nappe, des plans d'eau petits ou grands peuvent apparaître dans d'autres catégories de carrières lorsque les apports en eau (ruissellement, précipitations...) l'emportent sur les pertes (évaporation, infiltration...). On trouve ainsi des plans d'eau dans des carrières de roches massives ou dans des gravières hors-nappe peu perméables.

L'apparition d'un plan d'eau s'accompagne de la création de rives et de berges. Cette frange, où le substrat se situe entre 2 m au-dessous et 1 à 2 m au-dessus des eaux (nappe ou autre), constitue l'une des opportunités majeures pour un aménagement écologique. Cet aspect est largement développé dans ce document, car cette lisière (= *écotone* en termes écologiques) entre la terre, l'air et l'eau est l'endroit privilégié pour la constitution d'habitats des zones humides.

(11) On parle ici du cas général, car lorsque le sol initial est original, il peut être intéressant de le reconstituer, au moins sur une partie du site aménagé.

FIG. 6.- Les principales conséquences de l'exploitation de sables et graviers baignés par la nappe : (1) création d'un plan d'eau, (2) modification de la topographie, (3) diversification des sols.



1.2.1. CARACTÉRISTIQUES TOPOGRAPHIQUES

L'exploitation entraîne des modifications topographiques car il y a nécessairement des mouvements de terres. Le cadre général est imposé par le creusement d'une excavation, l'exportation des matériaux exploités comme granulats et les caractéristiques propres au gisement. Toutefois, on dispose d'une grande liberté d'une part en jouant sur la disposition des substrats laissés en place, d'autre part en réutilisant judicieusement les terres décapées. Il existe toute une gamme d'*éléments topographiques atypiques* que l'on peut conserver ou créer sur carrière et qui sont d'intérêt écologique : îles et îlots, microfalaïses, chenaux, dépressions humides, mares, éboulis, blocs rocheux... Dans ce domaine la diversité est la bienvenue.

1.2.2. CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

La nature des substrats d'une carrière après exploitation dépend pour partie des matériaux exploités et disponibles sur place, pour partie de la nature des terrassements réalisés. Toutefois, dans tous les cas, l'extraction met à jour des roches souterraines. Ceci constitue une chance qu'il faut mettre à profit, plutôt que d'essayer systématiquement de recréer un « sol » en remettant en place les couches telles qu'elles étaient à l'état initial.

Les sols reconstitués (généralement avec une sous-couche de stériles recouverts de terre végétale) présentent en effet des carences par rapport aux sols en place (compaction, microstructure différente, drainage insuffisant ou excessif...). D'un point de vue écologique, ces types de substrats étant fréquents, ils ne présentent qu'un intérêt limité⁽¹¹⁾.

En revanche, on a la possibilité de laisser affleurer des substrats originaux : roches meubles telles que les sables siliceux, les sables calcaires ou les argiles, et en carrière de roches massives des calcaires, des schistes, des grès... Les tourbes fossiles qu'on peut trouver au sein des alluvions en sont un autre exemple. Certes il s'agit de substrats « difficiles », mais ils sont relativement rares et leur flore est originale et spécialisée.

1.3. La stratification verticale et le zonage horizontal

Toute carrière en eau possède au moins un plan d'eau. Le terme *plan d'eau* est pris dans son sens le plus large, vis-à-vis de sa taille et de sa profondeur : mares, étangs ou lacs de gravières. Le fonctionnement écologique des plans d'eau est complexe et varie selon leurs caractéristiques. Cependant, la distribution spatiale des communautés vivantes en constitue une approche simple et assez générale. La *stratification*



PLANCHE II. (M. COURCOUX).- Si la gravière constitue le cas le plus fréquent de la carrière en eau, on n'oubliera pas le cas des carrières de roches massives. Dans les deux cas, les importantes modifications physiques entraînés par l'exploitation peuvent être mises à profit et constituer des atouts pour un aménagement à vocation naturelle. Sur cette illustration on voit que le carreau de la carrière est partiellement en eau (infiltrations, captation d'un ruisseau...) ce qui permet l'installation de milieux humides (mares, prairies et bois humides...). Les modifications topographiques sont importantes avec la création d'une petite falaise et d'éboulis à ses pieds, qui peuvent abriter des espèces remarquables, en particulier de reptiles. Le carreau de la carrière présente un sol minéral brut et siliceux qui associé à l'humidité propose des milieux de vie peu représentés dans nos paysages. Un tel site pourra par exemple abriter des orchidées de prairies humides acides ou un petit amphibien peu fréquent : le crapaud calamite.

verticale n'est complète que pour des plans d'eau de profondeur suffisante. En revanche, le *zonage horizontal*, qui se développe depuis les pleines eaux jusqu'aux berges est une constante, même s'il est difficilement observable lorsque les rives sont trop raides.

1.3.1. LA STRATIFICATION VERTICALE DES COMMUNAUTÉS AQUATIQUES

Suivant leur positionnement dans la colonne d'eau, on reconnaît traditionnellement trois communautés dans les écosystèmes aquatiques :

- La **communauté benthique** comprend les animaux vivant sur ou à proximité du fond : insectes et larves d'insectes aquatiques, mollusques, gastéropodes, bivalves, annélides et crustacés ;

- La **communauté pélagique** qui se trouve dans la colonne d'eau ; elle se décompose elle-même en deux sous-communautés :

- ⇒ le **plancton** qui vit en suspension relativement passive et qui est composé de *phytoplancton* (organismes végétaux libres) et de *zooplancton* (organismes animaux ne dépassant pas quelques mm) ;
- ⇒ le **necton** qui comprend des animaux nageant activement comme les Poissons.

- La **communauté littorale** vit à la surface dans les zones de bordure peu profondes :

- ⇒ les **hydrophytes**, végétaux entièrement aquatiques, enracinés ou flottants ;
- ⇒ le **périphyton**, algues fixées sur divers types de supports ;
- ⇒ la communauté animale associée.

Photo 8. Le secteur de transition où se rencontrent les milieux aquatique et terrestre s'appelle la zone d'atterrissement du plan d'eau. Les différents types de végétation, correspondant à un gradient des conditions d'humidité, s'appellent des ceintures de végétation (M. Pajard).

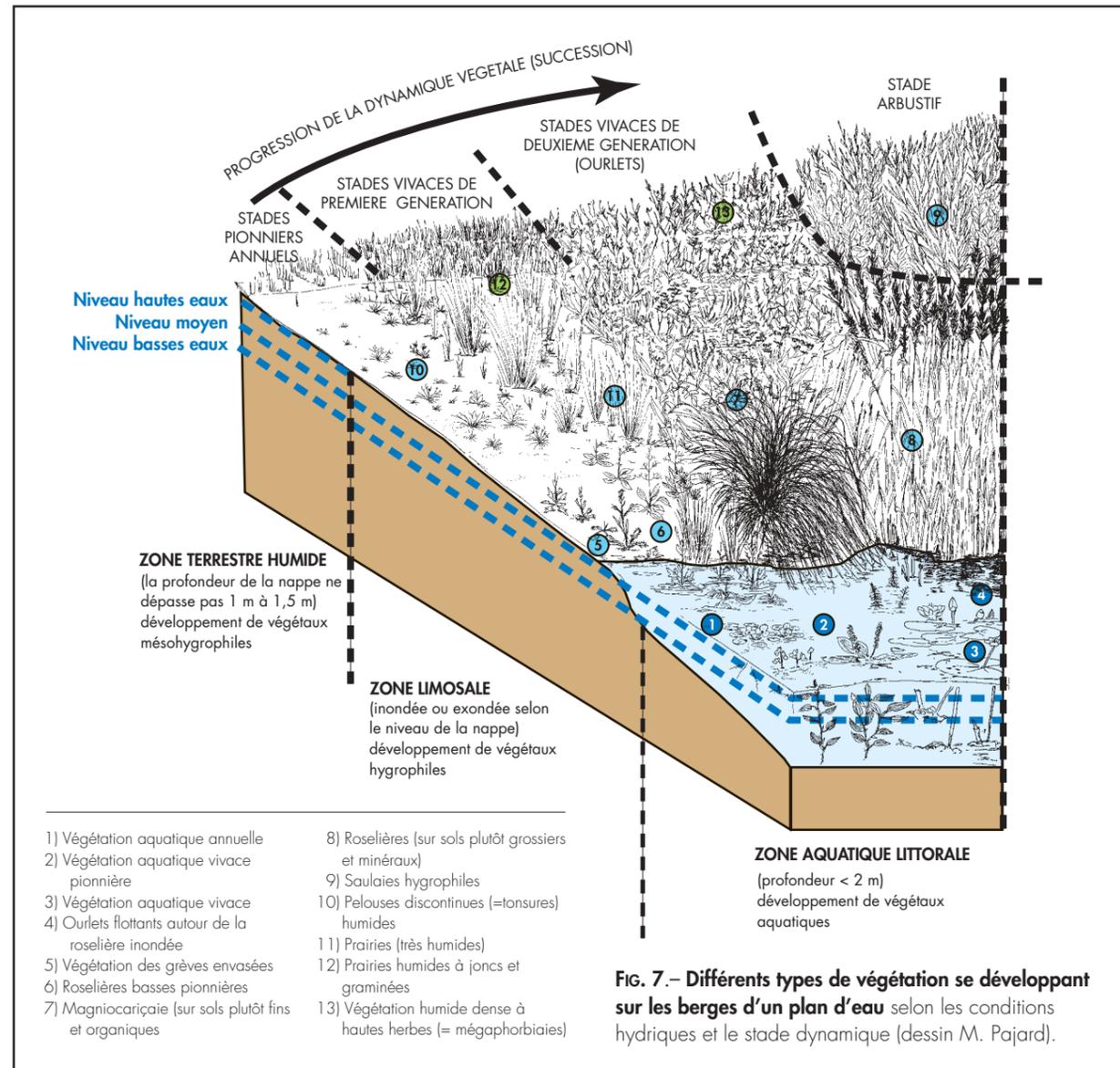


Photo 9. Le Nymphaea blanc (*Nymphaea alba*) dans un plan d'eau de gravière au bord de la Durance. L'espèce est rare et protégée en région PACA (CNC - IARE).



1.3.2. LE ZONAGE HORIZONTAL ET LES CEINTURES DE VÉGÉTATION

Au niveau des berges d'un plan d'eau, la profondeur diminue plus ou moins lentement et la lame d'eau décroît jusqu'à laisser la place à la berge hors d'eau. Cet *atterrissement*, surtout lorsqu'il est progressif, se traduit dans la composition de la végétation par différentes *ceintures* d'espèces présentant des biologies différentes. On pourra alors distinguer :

- 1) **Une zone aquatique profonde** où les végétaux enracinés ne prennent pas pied ;
- 2) **Une zone aquatique littorale au sens large** allant jusqu'au niveau d'étiage des eaux : on peut la subdiviser en zones à plantes submergées et zone à plantes à feuilles flottantes et plantes submergées ;
- 3) **Une zone limosale** correspondant à la hauteur de marnage du plan d'eau, qui suivant le niveau de la nappe et du plan d'eau, est inondée ou exondée ; la partie située sous le niveau moyen de la nappe est souvent distinguée car c'est le domaine de prédilection des *hélrophytes*, végétaux enracinés dans la vase et qui jouent un rôle essentiel dans la constitution des zones humides ;
- 4) **Une zone terrestre humide (= supralittorale)**, jamais ou rarement inondée mais présentant des phénomènes d'engorgement ; la nappe n'y est pas au-dessous de 1 m à 1,5 m sous le terrain naturel.
- 5) Enfin **la zone terrestre non humide**.

Les **zones humides** correspondent aux niveaux 2 à 4. Les végétaux qui s'y développent dépendent des caractéristiques propres aux plans d'eau.

Lorsque la pente est forte, les différentes ceintures ont tendance à se « télescoper », aucune n'étant pleinement développée, certaines étant absentes.

1.4. Quelques groupes de plantes caractéristiques des carrières en eau

La présentation de quelques groupes de végétaux caractéristiques des carrières en eau permettra de se faire une idée concrète de la végétation de ces milieux. C'est leur habitat qui sert à les définir. Il faut cependant insister sur ce point : les « carrières en eau » ne peuvent servir à définir un type d'écosystème. En effet, les conditions varient beaucoup d'un site à l'autre : climat, zone biogéographique, pH du sol, richesse nutritive...

Pour avoir une vue synthétique de la végétation des carrières en eau, on retiendra donc essentiellement trois types de critères applicables dans pratiquement tous les cas : âge de la végétation, fonctionnement hydrique, et perturbation du sol.

1.4.1. LES ESPÈCES AQUATIQUES

Les espèces dites aquatiques vivent en pleine eau jusqu'à une profondeur approximative de 2 m. Elles peuvent être flottantes ou enracinées. Leurs feuilles peuvent rester submergées, s'étaler à la surface ou sortir franchement de l'eau. Parmi les espèces particulièrement fréquentes dans les gravières, citons : la Lentille d'eau (*Lemna minor*), le Myriophylle en épis (*Myriophyllum spicatum*), le Cératophylle épineux (*Ceratophyllum demersum*), l'Élodée du Canada (*Elodea canadensis*), le Potamogeton nageant (*Potamogeton natans*), la Renoncule aquatique à feuilles capillaires (*Ranunculus trichophyllus*)... Les plans d'eau récents sont souvent riches en Potamots divers (*P. pusillus*, *P. perfoliatus*...). Le Nénuphar jaune (*Nuphar lutea*) et le Nénuphar blanc (*Nymphaea alba*) caractérisant en général des plans d'eau plus âgés.

Des espèces aquatiques peu communes régionalement sont assez régulièrement présentes dans les plans d'eau de carrières. On peut même trouver des espèces remarquables comme l'Hottonie des marais (*Hottonia palustris*), la Zannichélie des marais (*Zannichelia palustris*), les Naiades (*Najas marina*, *N. minor*) ou les Utriculaires (*Utricularia* spp.).

1.4.2. LES ESPÈCES ANNUELLES DES GRÈVES

Les grèves constituent l'un des habitats les plus originaux auxquels les gravières sont susceptibles de donner naissance. Il s'agit de zones récentes, incomplètement colonisées par la végétation, où peuvent affleurer les différents substrats mis à jour par l'extraction : graviers, sables, limons, argiles... Suivant la texture, mais aussi



Photo 10. La Patience maritime (*Rumex maritimus*), une espèce des sols humides argilo-limoneux qu'on rencontre sur les grèves des plans d'eau ou des bassins de décantation de carrières (G. Arnal).

selon la richesse en éléments nutritifs et la longueur de la durée d'inondation, on distingue différents types de grèves. En conditions naturelles, ces milieux sont régulièrement formés ou rajeunis par la dynamique des eaux le long des cours d'eau ou au bord des étangs et des lacs : crues, inondations prolongées, courant, batillage... Cependant, la régularisation croissante de ces phénomènes, ainsi que le corsetage des cours d'eau ont conduit à une raréfaction des grèves et par conséquent de leurs espèces. D'où l'intérêt de leur présence sur carrière, même si celle-ci est éphémère en l'absence de rajeunissement.

Ces grèves sont colonisées par des espèces annuelles de taille petite à moyenne, par exemple le Jonc des crapauds (*Juncus bufonius*), le Bident tripartite (*Bidens tripartita*), le Gnaphale des marais (*Gnaphalium uliginosum*), la Renouée à feuilles de patience (*Polygonum lapathifolium*), le Chénopode rouge (*Chenopodium rubrum*), la Chlore perfoliée (*Blackstonia perfoliata*)... Lorsqu'elles présentent une certaine extension, ce qui suppose des berges en pente très douce, ces grèves abritent pratiquement systématiquement des espèces d'intérêt au moins régional. Parmi les espèces rares dans leur région et qui y sont connues sur carrières, citons par exemple la Renouée scélérate (*Ranunculus sceleratus*) qui est rare dans tout le Sud-Est, le Bident penché

(*Bidens cernua*), le Scirpe épingle (*Eleocharis acicularis*), le Scirpe ovoïde (*Eleocharis ovata*), la Ludwigie des marais (*Ludwigia palustris*), la Patience maritime (*Rumex maritimus*), la Véronique à écussons (*Veronica scutellata*)... La Pulicaria commune (*Pulicaria vulgaris*), qui comme ne l'indique pas son nom est fort rare puisqu'elle est protégée nationale, peut se trouver sur des grèves argilo-limoneuses de gravières.

1.4.3. LES ESPÈCES VIVACES DES BERGES INONDÉES

Les espèces vivaces de berges inondées se trouvent dans des sols inondés une partie de l'année ou immergés toute l'année, mais très peu profonds. Il y a donc là des espèces "amphibies" appartenant à des groupes écologiques un peu différents, mais qui sont réunies par souci de simplification. D'ailleurs, les niveaux topographiques pouvant varier fort rapidement le long des berges, ces espèces se trouvent en mélange. Ce sont des végétaux vivaces, enracinés dans la vase (= *hélophytes*), qui progressivement remplacent les espèces annuelles de grèves. L'aspect général est celui d'une végétation de taille moyenne, à l'exception de certaines hampes florales qui peuvent s'élever, parfois continue, parfois plus ou moins ouverte. Les espèces caractéristiques sont par exemple les Plantains d'eau (*Alisma plantago-aquatica*, *A. lanceolatum*), la Véronique mouron-d'eau (*Veronica anagallis-aquatica*), la Menthe aquatique (*Mentha aquatica*), le Scirpe des marais (*Eleocharis palustris*), le Myosotis des marais (*Myosotis scorpioides*), le Rorippe amphibie (*Rorippa amphibia*)...

Bien que l'intérêt moyen de ces espèces n'atteigne pas celui des deux groupes précédents, on peut trouver assez régulièrement des espèces de valeur patrimoniale. Parmi les plus remarquables, connues sur différentes gravières, citons par exemple, le Butome en ombelles (*Butomus umbellatus*), la Menthe pouliot (*Mentha pulegium*) ou le Rubanier simple (*Sparganium emersum*).

1.4.4. LES ESPÈCES DES ROSELIÈRES ET CARIÇAIES

Les roselières et cariçaies se trouvent sur des substrats très humides avec ou sans assèchement estival. Les premières sont dominées par des roseaux l. s., c'est-à-dire de grandes herbes graminéoïdes comme le Phragmite commun (*Phragmites australis*), les Massettes (*Typha latifolia*, *T. angustifolia*), la Canne de Ravenne (*Imperata cylindrica*)... Les secondes doivent leur nom aux laïches (en latin : *carex*), qui for-

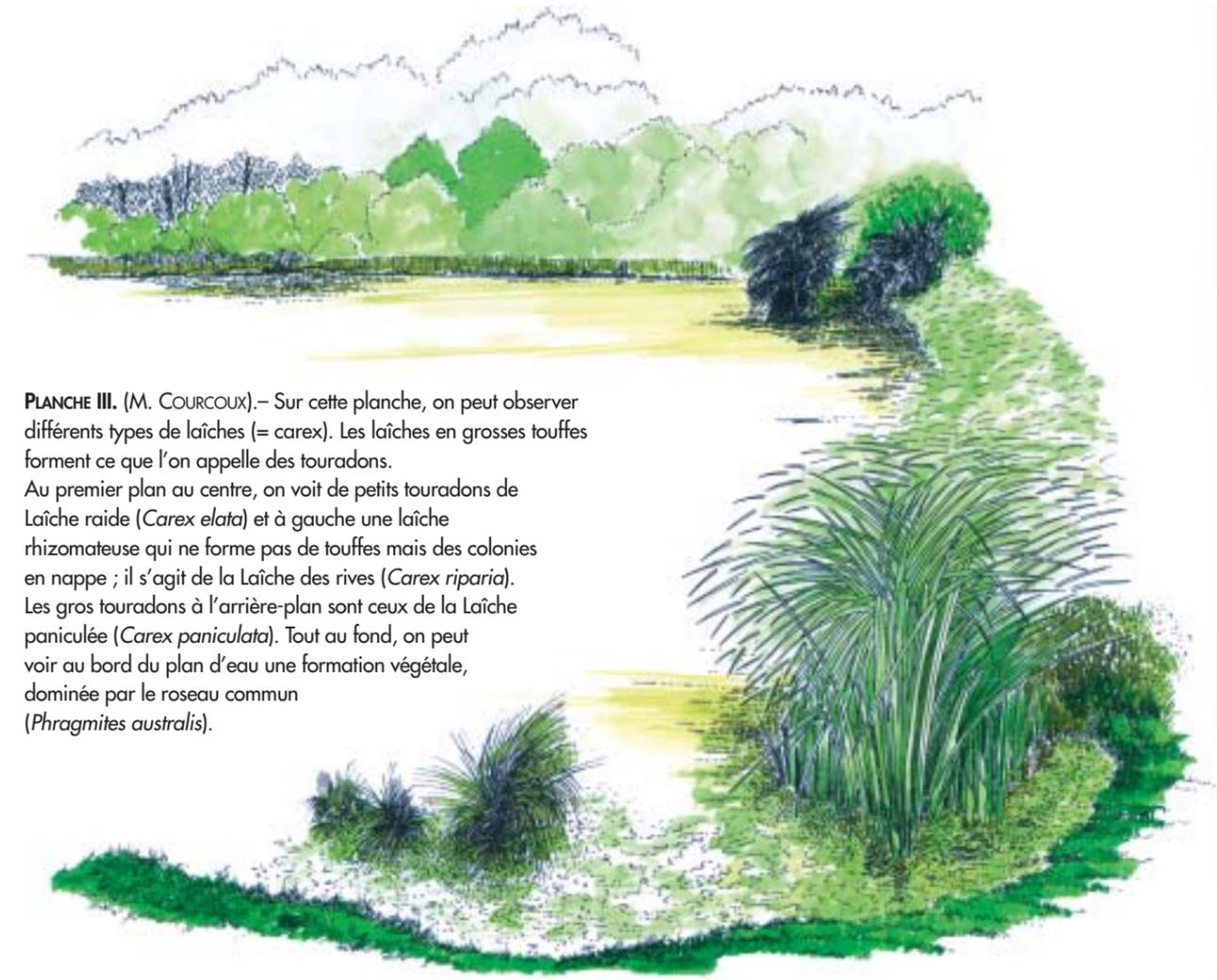


PLANCHE III. (M. COURCOUX).— Sur cette planche, on peut observer différents types de laïches (= carex). Les laïches en grosses touffes forment ce que l'on appelle des touradons.

Au premier plan au centre, on voit de petits touradons de Laïche raide (*Carex elata*) et à gauche une laïche rhizomateuse qui ne forme pas de touffes mais des colonies en nappe ; il s'agit de la Laïche des rives (*Carex riparia*). Les gros touradons à l'arrière-plan sont ceux de la Laïche paniculée (*Carex paniculata*). Tout au fond, on peut voir au bord du plan d'eau une formation végétale, dominée par le roseau commun (*Phragmites australis*).



Photo 11. Le Jonc (ou Scirpe) des chaisiers (*Schoenoplectus lacustris*), une espèce de roselière qui affectionne les eaux riches en minéraux dissous (G. Arnal).

ment des peuplements où les pieds sont soit régulièrement répartis (*Carex riparia*, *C. acutiformis*, *C. acuta*...), soit groupés en grosses touffes appelées « touradons » (*Carex pseudocyperus*, *C. paniculata*, *C. elata*...). À ces espèces sociales se mêlent des espèces du groupe précédent ainsi que l'Iris d'eau (*Iris pseudacorus*), le Chanvre d'eau (*Lycopus europaeus*), la Morelle douce-amère (*Solanum dulcamara*), la Lysimachie commune (*Lysimachia vulgaris*)...

Ces formations présentent assez régulièrement un intérêt de niveau régional grâce à des espèces citées au paragraphe précédent, qui apparaissent dans les ouvertures, soit à quelques espèces qui ne sont pas des raretés nationales, mais sont peu fréquentes dans certaines régions de France. Citons par exemple, le Marisque (*Cladium mariscus*), le Scirpe des chaisiers (*Schoenoplectus lacustris*), la Laïche à bec (*Carex rostrata*)...

1.4.5. LES ESPÈCES DES MÉGAPHORBIAIES

Le terme « mégaphorbiaie » qui signifie « hautes herbes » est réservé en botanique à des formations de hautes plantes vivaces se développant sur des sols humides riches en matières nutritives (= *eutrophes*). Au niveau des berges des plans d'eau, elles sont topographiquement au-dessus des roselières et cariçaies. Cependant, il faut reconnaître que dans bien des cas, les pentes sont insuffisamment douces pour que cette zonation soit nette, et l'on assiste à un mélange des deux types de formations. Notons par ailleurs que des formations présentant un aspect extérieur de roselières, peuvent se révéler être des mégaphorbiaies en termes de composition floristique. Les espèces les plus classiques sont la Salicaire (*Lythrum salicaria*), l'Épilobe hirsute (*Epilobium hirsutum*), le Houblon (*Humulus lupulus*), l'Eupatoire chanvrine (*Eupatorium cannabinum*), la Baldingère (*Phalaris arundinacea*), l'Angélique des bois (*Angelica sylvestris*), le Liseron des haies (*Galystegia sepium*), la Consoude officinale (*Symphytum officinale*), etc.

Les mégaphorbiaies accueillent régulièrement quelques espèces peu fréquentes à l'échelle régionale comme l'Achillée sternutatoire (*Achillea ptarmica*) ou la Prêle élevée (*Equisetum telmateia*).

Photo 12. La Salicaire (*Lythrum salicaria*) une espèce commune des mégaphorbiaies, que l'on trouve également dans les roselières (G. Arnal).



1.4.6. LES ESPÈCES ANNUELLES DES FRICHES

Les espèces annuelles de friches sont typiquement celles qui colonisent immédiatement les remblais classiques de gravières, c'est-à-dire des substrats argilo-sablo-limoneux, riches à assez riches en matières nutritives. Le régala de terre végétale accélère la colonisation.

Ce groupe d'espèces est le plus représenté sur les carrières récentes, ce qui s'explique par la fréquence des remblais et la grande diversité des espèces profitant de l'opportunité pour s'y établir. On n'y trouve pas vraiment de grandes raretés, mais le lot d'espèces peu communes au niveau régional est pratiquement toujours significatif. Parmi la grande diversité de ces espèces, citons-en quelques-unes peu fréquentes sur l'ensemble du territoire mais connues sur carrières dans différentes régions : la Gesse de Nissolle (*Lathyrus nissolia*), l'Euphorbe à larges feuilles (*Euphorbia platyphyllos*), la Fausse Roquette de France (*Erucastrum gallicum*), le Sénéçon visqueux (*Senecio viscosus*)...

1.4.7. LES ESPÈCES VIVACES DES FRICHES

Les espèces vivaces des friches relaient rapidement les précédentes lorsque l'on passe du stade pionnier au stade post-pionnier. Le faciès de « friche » devient alors caractéristique avec des espèces épineuses comme le Cirse des champs (*Cirsium vulgare*), le Cirse commun (*Cirsium vulgare*), la Cardère (*Dipsacus fullonum*), la Vipérine (*Echium vulgare*) ou non épineuses comme le Chiendent rampant (*Elytrigia repens*), l'Armoise commune (*Artemisia vulgaris*), le Sénéçon jacobée (*Senecio jacobaea*), la Carotte sauvage (*Daucus carota*), le Millepertuis perforé (*Hypericum perforatum*)...

La richesse spécifique de ces friches est généralement élevée. De façon encore plus nette que pour les friches annuelles, on constate très régulièrement la présence de plusieurs espèces d'intérêt régional, mais très peu souvent des espèces vraiment rares.

Les espèces conférant de l'intérêt à ces friches sont par exemple le Chardon penché (*Carduus nutans*), la Barkhausie hérissée (*Crepis setosa*), la Mauve alcée (*Malva alcea*), le Passerage drave (*Cardaria draba*), la Molène blattaire (*Verbasicum blattaria*)...

1.4.8. LES ESPÈCES DES PELOUSES SABLEUSES SÈCHES ET OLIGOTROPHES

Les pelouses sableuses sèches et oligotrophes ont ceci de particulier de n'être présentes que sur certaines gravières, mais d'y être pratiquement systématiquement de grand intérêt patrimonial. La première condition pour que de telles pelouses s'installent est de disposer de substrats adé-

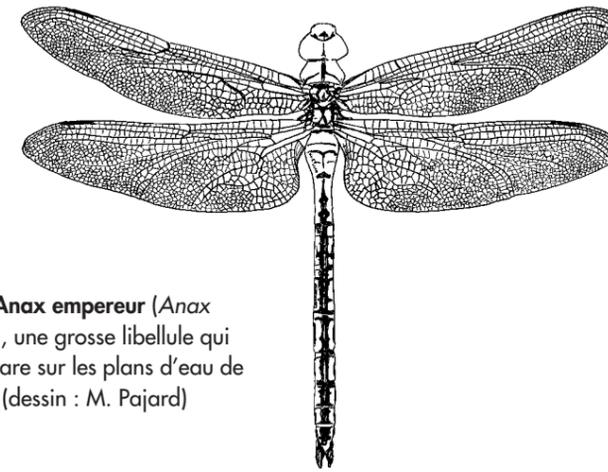


FIG. 8. – L'Anax empereur (*Anax imperator*), une grosse libellule qui n'est pas rare sur les plans d'eau de gravières. (dessin : M. Pajard)

quats, c'est-à-dire de sables très pauvres : on peut les trouver en lit mineur si les alluvions sont siliceuses ou sur les terrasses moyennes et hautes. Le sable est siliceux ou silico-calcaire, peu à pas argileux. La seconde condition est que ces sables aient été utilisés tels quels en remblais ou laissés en place, et qu'ils ne soient pas recouverts ou mélangés de terre végétale.

De tels milieux « steppiques », à végétation rase et le plus souvent éparse, très peu fertiles, ne sont pas courants dans nos paysages. C'est pourquoi beaucoup d'espèces qui s'y installent sont peu fréquentes ou rares, et ce sur l'ensemble du territoire français. Certaines des plus rares d'entre elles semblent avoir du mal à se fixer sur carrières, cependant celles-ci abritent un lot remarquable d'espèces d'intérêt. Citons par exemple l'Astérocarpe blanchâtre (*Sesamoides purpurascens*), l'Hélianthème tâché (*Xolantha guttata*), la Véronique printanière (*Veronica verna*), le Pied-d'oiseau penné (*Ornithopus pinnatus*), la Porcelle glabre (*Hypochaeris glabra*), l'Agrostis interrompue (*Apera interrupta*), la Fausse camomille (*Anthemis arvensis*), l'Orpin élégant (*Sedum forsterianum*), l'Orpin rougeâtre (*Sedum rubens*)...

1.4.9. LES ESPÈCES LIGNEUSES DES MILIEUX HUMIDES

La colonisation des berges humides par des arbres et arbustes est caractéristique des bords de gravières. Une saulaie hygrophile faite d'espèces à croissance rapide investit souvent très vite les berges graveleuses : Saule blanc (*Salix alba*), Saule des vanniers (*Salix viminalis*), Saule pourpre (*Salix purpurea*), Saule à trois étamines (*Salix triandra*). Le développement de boisements hygrophiles dominés par l'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*) ou le Peuplier blanc (*Populus alba*) est plus lent et se réalise sur des sols plus argileux.

1.5. Les principaux groupes d'animaux des carrières en eau

Les animaux invertébrés constituent sur Terre la grande majorité des espèces animales. Il n'est pas question ici de présenter ceux des carrières tant ils sont divers. D'ailleurs, trop peu d'études leur ont été consacrées pour qu'on puisse en présenter une vision synthétique. Tout ce qu'on en connaît montre que les plans d'eau issus de l'exploitation des granulats ont des populations et un fonctionnement analogues à celui des autres plans d'eau, naturels ou artificiels. En particulier, la mise à jour de la nappe « mime » le rajeunissement des étangs. Signalons cependant le groupe des libellules (ordre des *Odonates*), mieux connu et pour lequel les carrières peuvent jouer un rôle de biotope de substitution.

Les animaux vertébrés sont constitués des poissons, des amphibiens, des reptiles, des oiseaux et des mammifères.

Les reptiles sont marginaux dans les carrières en eau et les mammifères sont peu concernés, même si certaines espèces remarquables telles que la loutre, le castor ou la musaraigne aquatique peuvent les exploiter.

En revanche, les trois autres classes (**Poissons, Amphibiens et Oiseaux**) méritent d'être présentées, compte tenu de leur importance dans les carrières.

1.5.1. LES POISSONS

Le peuplement en poissons des plans d'eau de gravières se fait spontanément lorsqu'ils sont reliés au cours d'eau, que ce soit de façon permanente ou en période de crue. Lorsque les plans d'eau sont isolés hydriquement, les espèces ont nécessairement été introduites, le plus souvent pour la pêche.

les guildes d'espèces

Les espèces de poissons sont classées selon le substrat sur lequel elles déposent leurs œufs.

Les espèces lithophiles pondent sur des substrats minéraux. Beaucoup d'entre elles sont des espèces d'eau courante (rhéophiles) qui sont aussi généralement les plus exigeantes quant à la qualité du milieu (teneur en oxygène dissous en particulier). Compte tenu de leurs préférences écologiques ces espèces sont peu représentées dans les eaux closes, sauf les lacs de montagne. Cependant, dans les gravières communiquant avec un cours d'eau, on peut rencontrer des espèces comme le Chevesne, le Barbeau, le Hotu... Malgré tout, leur domaine de prédilection est plutôt situé vers l'amont, tandis que les gravières sont plus nombreuses à l'aval. Des

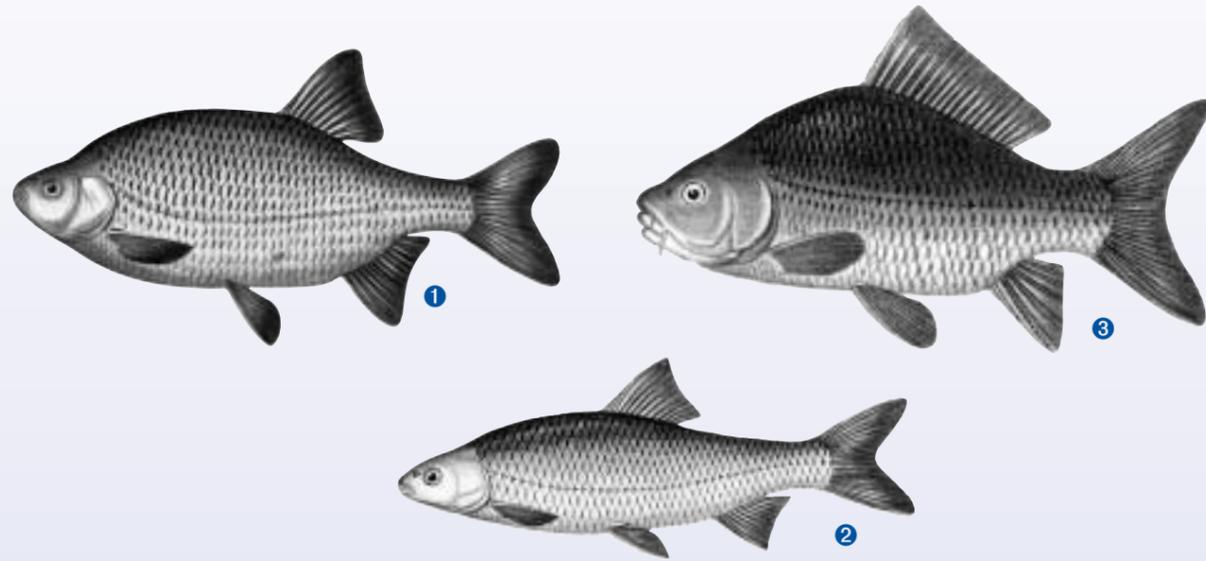


FIG. 9. – Quelques poissons courants dans les eaux des gravières (Fernand Angel).

- 1) Rotangle (*Scardinius erythrophthalmus*)
- 2) Gardon (*Rutilus rutilus*)
- 3) Carpe commune (*Cyprinus carpio*)

espèces lithophiles d'eaux stagnantes (limnophiles) comme le Sandre peuvent également fréquenter les gravières.

Les espèces **phytophiles** préfèrent déposer leur ponte sur des végétaux. Ces espèces sont généralement liées aux eaux peu courantes à stagnantes (limnophiles) et sont moins exigeantes relativement à la qualité des eaux. En revanche, la présence d'herbiers aquatiques est un impératif pour leur reproduction. On pourra citer comme exemples de ce groupe d'espèces, la Tanche, la Carpe commune, le Rotangle. Le cas du Brochet est plus particulier puisqu'il se reproduit dans des milieux herbacés inondés l'hiver d'où il devra pouvoir regagner la rivière après reproduction.

Les espèces **généralistes** ont de faibles exigences et peuvent se trouver dans une large gamme de milieux aquatiques, y compris les plans d'eau de gravières. Elles déposent leur ponte sur tout type de substrat. C'est par exemple le cas de la Brème commune, du Gardon, de la Perche, de l'Ablette. Ces espèces dominent en général les peuplements spontanés (non issus d'alevinages ou introductions) des plans d'eau de gravière.

Les espèces introduites indésirables

Les espèces indésirables sont le Poisson-chat et la Perche soleil, importées d'Amérique du Nord (et le Silure dans le quart Sud-Est de la France, qui vient du bassin du Danube). Les gravières récemment exploitées créent des conditions favorables à la prolifération de ces espèces résistantes et peu exigeantes, qui colonisent facilement des milieux nouveaux et difficiles. Leur fécondité et leur comportement agressif leur permettent d'évincer les autres espèces et d'exploiter au maximum les ressources nutritives

(matières organiques, plancton, invertébrés, macrophytes, vertébrés). Lorsqu'elles envahissent un plan d'eau, ces espèces atteignent couramment plus de 90 % de tout le peuplement de poissons.

Les gravières non isolées fonctionnent en partie comme des annexes hydrauliques naturelles

Au même titre que les bras morts et autres annexes hydrauliques naturelles des cours d'eau, les plans d'eau de gravières, **à condition qu'ils ne soient pas isolés des crues**, sont susceptibles de jouer des rôles utiles dans la biologie des poissons, en particulier comme zone d'alimentation ou comme zone de refuge en cas de pollution, de courants forts, de vidanges de barrage, etc. En tant que zones de reproduction, les gravières sont utiles quand les annexes fluviales manquent, mais semblent moins efficaces que celles-ci en densité d'alevins (productivité insuffisante ?).

La concurrence des poissons avec d'autres groupes

Dans les plans d'eau eutrophes, le nombre de poissons phytophages et planctivores a tendance à croître de manière importante. La consommation de zooplanctons, d'invertébrés et de végétaux supérieurs devient alors excessive et la concurrence avec d'autres groupes (Odonates, Amphibiens, Oiseaux) devient sévère.

1.5.2. LES PRINCIPAUX GROUPES D'OISEAUX NICHEURS

Les carrières en eau peuvent être utilisées par les oiseaux à n'importe quelle période de l'année et tout au long de leur cycle biologique (nidification, migration, hivernage). C'est cependant en période de nidification que l'in-

térêt des carrières est le plus crucial. Celui-ci est principalement dû à la présence d'eau libre, au développement d'une végétation de zones humides et enfin à la présence de milieux totalement minéraux. Il est à noter que pour certaines espèces, la seule présence de végétation palustre est attractive, tandis que pour d'autre l'association « plan d'eau + végétation palustre » est indispensable. Les espèces présentées ci-dessous sont effectivement connues sur plusieurs sites français et l'on peut considérer que leur utilisation des sites de gravières n'a rien d'accidentel.

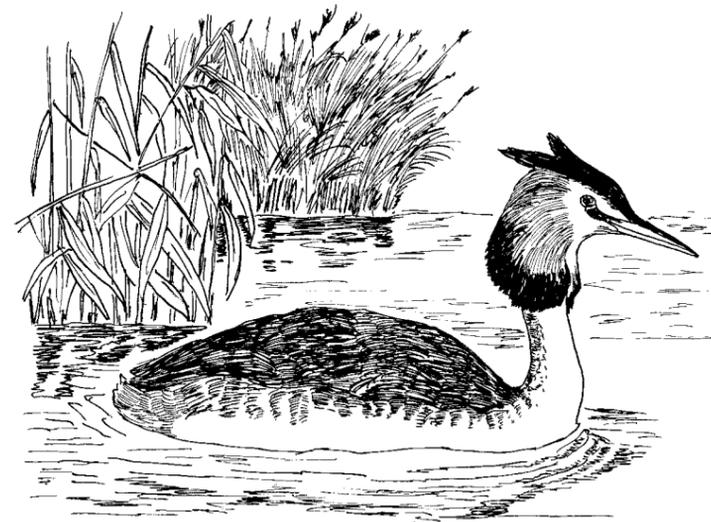
Deux espèces d'eau, communes en France, sont très fréquemment nicheuses sur les gravières, à savoir le Canard colvert (*Anas platyrhynchos*) et la Poule d'eau (*Gallinula chloropus*). Ce sont des espèces ubiquistes⁽¹²⁾ de zones humides, nichant dans des milieux divers à proximité de l'eau. Cette fréquence tient à leur biologie très plastique : faibles exigences en termes de biotope (un peu d'eau et un peu de végétation), comportement de recherche continue de nouveaux habitats qui en fait des colonisatrices précoces, capacité à se maintenir dans des sites vieillissants, grande tolérance aux perturbations (fréquentation, chasse, activités diverses...).

Les espèces nichant préférentiellement dans les ceintures de végétation inondée (roselières, jeunes saulaies...) en bordure de plan d'eau

Dans ce groupe, trois espèces sont fréquentes sur les gravières. Il s'agit d'abord de la Foulque macroule (*Fulica atra*) qui est commune en France, en particulier d'ailleurs du fait qu'elle a profité des gravières, surtout eutrophes. Les deux autres espèces, à savoir le Grèbe castagneux (*Tachybaptus ruficollis*) et le Grèbe

(12) Voir lexique.

FIG. 10. – Le Grèbe huppé (*Podiceps cristatus*), une espèce favorisée par les plans d'eau de carrières. (dessin : M. Pajard)



huppé (*Podiceps cristatus*) sont des nicheurs respectivement rare et assez rare en France, avec cependant une tendance à l'augmentation des effectifs. Dans ce même groupe, la nidification sur gravière du Fuligule milouin (*Aythya ferina*), rare et en régression au niveau national, mérite également d'être soulignée. Bien qu'elles n'enrayent pas sa régression, les gravières fournissent à ce canard plongeur une compensation partielle à la destruction des zones humides, d'autant que l'espèce adopte volontiers des milieux artificiels, si ceux-ci présentent une productivité importante en invertébrés. Notons aussi la nidification assez fréquente du Cygne tuberculé (*Cygnus olor*).

On peut considérer que ce groupe non seulement est favorisé par les gravières, mais que ces dernières jouent globalement un rôle important pour le soutien des effectifs de ces espèces. Ceci est particulièrement vrai des Grèbes castagneux et huppé.

Les espèces nichant dans la végétation hélophytique inondée ou très humide en permanence (roselières, très jeunes saulaies...)

Ce groupe comporte des espèces aux exigences diverses.

Parmi les fauvettes paludicoles, la Rousserolle effarvatte (*Acrocephalus scirpaceus*), espèce commune, est la plus fréquente sur les gravières : elle se contente de très petits massifs d'hélophytes. La Rousserolle turdoïde (*Acrocephalus arundinaceus*), autre fauvette paludicole, rare et en régression en France est beaucoup plus exigeante en termes de superficie et de qualité de l'habitat. Mais si les conditions sont réunies, on peut la trouver sur les gravières, avec des densités de couples remarquables.

La fréquence du Râle d'eau (*Rallus aquaticus*) sur les gravières est à noter, d'autant que l'espèce est actuellement en régression assez marquée. Il est pratiquement absent des gravières les plus jeunes et semble en revanche assez fréquent sur les sites anciens comprenant des ceintures de végétation bien développées. Cependant l'espèce ne se maintient pas lorsque les berges sont colonisées par les ligneux ou lorsqu'elles sont trop entretenues.

Autre espèce en forte régression, dont la nidification sur gravières est significative : le Blongios nain (*Ixobrychus minutus*). Ce petit héron, exigeant quant à son habitat, est exclusivement associé aux îlots et berges inaccessibles, envahies par une végétation hélophytique, parfois mêlée à de jeunes saulaies. Le Héron pourpré (*Ardea purpurea*), autre héron en régression, est nicheur sur différentes gravières du Sud de la France.

Photo 13. Le Héron pourpré (*Ardea purpurea*), un oiseau nicheur rare et en régression en France, qui s'adapte sur les carrières. Il est pris en photo ici, en vol au-dessus d'une gravière de la région toulousaine où il est nicheur (CNC - ECTARE).

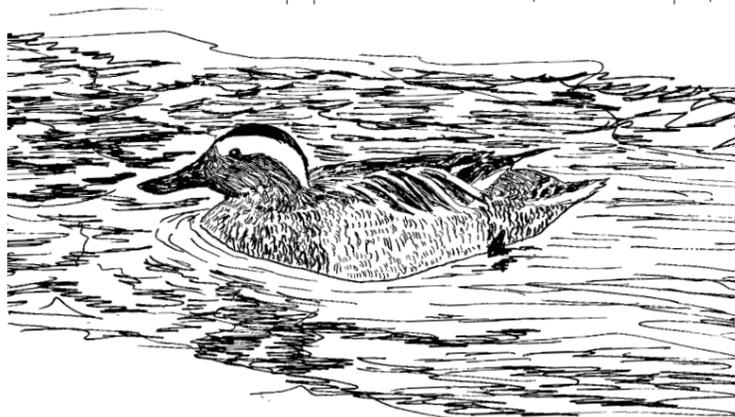


Les espèces nichant dans la végétation herbacée, non inondée (mégaphorbiaies, prairies, friches) en bordure de l'eau

Ce groupe, essentiellement composé de canards, est rarement bien représenté sur carrières. Ces espèces n'y trouvent souvent pas les grandes surfaces herbeuses doucement inclinées vers le plan d'eau qu'elles recherchent, et sont des nicheurs plutôt occasionnels et peu fidèles sur carrières. Il faut néanmoins préciser qu'il ne s'agit que d'espèces rares à très rares, souvent en régression : Canard souchet (*Anas clypeata*), Nette rousse (*Netta rufina*), Sarcelle d'hiver (*Anas crecca*), Sarcelle d'été (*Anas querquedula*)...

Le Fuligule morillon (*Aythya fuligula*), espèce très rare fait cependant exception. Il trouve dans les gravières un biotope de substitution qui lui permet de voir ses effectifs progresser. L'expérience montre qu'il est souvent associé à des carrières jeunes, souvent pourvues d'îlots peu végétalisés ou colonisés par des friches peu denses.

Fig. 11. – La Sarcelle d'été (*Anas querquedula*) est une espèce d'Anatidé rare et en régression qui peut nicher sur carrière (dessin : M. Pajard).



Le Canard chipeau (*Anas strepera*), rare et en régression, n'est pas très fréquent sur gravière ; cependant quelques sites sont connus où il se reproduit fort bien.

Les espèces nichant dans des milieux minéraux peu ou pas végétalisés, en bordure de l'eau

On a là affaire à un groupe d'espèces assez communes à très rares, mais globalement en progression. On peut dire que la présence de ces espèces sur les carrières en eau est significative. Elles sont toujours associées soit à des carrières assez jeunes, comprenant des îlots non végétalisés, soit à des carrières plus anciennes comprenant des îlots régulièrement rajeunis par la dynamique fluviale. Les deux espèces les plus fréquentes sur les gravières sont la Mouette rieuse (*Larus ridibundus*) et la Sterne pierregarin (*Sterna hirundo*).

Les sternes, en tant qu'espèces pionnières des îlots de graviers, font partie des espèces phares des gravières qui constituent pour elles et des sites de substitution dans les zones qu'elles fréquentent déjà et de nouveaux sites leur permettant d'étendre leur aire. Depuis une trentaine d'années, la Sterne pierregarin a étendu son aire grâce à l'ouverture des gravières. Le même phénomène est peut-être en train de s'amorcer pour la Sterne naine avec les premières nidifications récentes en Seine-et-Marne. On peut dire qu'à l'heure actuelle les gravières jouent un rôle essentiel pour le maintien des populations de Sterne pierregarin. Mais, pour ces espèces exploitant des milieux pionniers, ce rôle ne pourra perdurer que si les sites de nidification sont régulièrement rajeunis.

La Mouette rieuse et la Mouette mélanocéphale (*Larus melanocephalus*), nicheuse très rare, profitent des gravières, d'autant qu'elles peuvent se maintenir sur des îles plus végétalisées que les Sternes, qu'en général elles chassent de leur site.

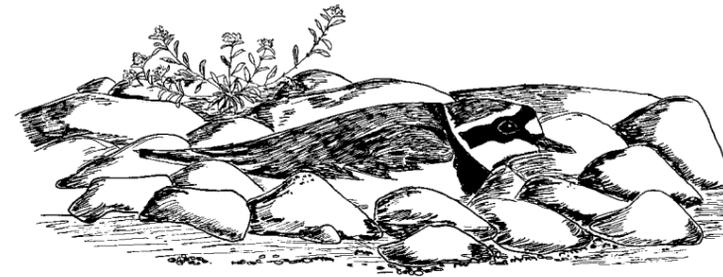


Fig. 12. – Le Petit Gravelot (*Charadrius dubius*), l'une des espèces d'oiseaux nicheurs les plus favorisées par les gravières. (dessin : M. Pajard).

Les espèces nichant dans des fronts de taille ou des tas de matériaux, généralement à proximité de l'eau

L'Hirondelle de rivage (*Riparia riparia*) fait partie des espèces largement favorisées par les gravières et sablières. Les colonies qu'elles forment dans les fronts de taille sont caractéristiques des sites récents. La remarquable fréquence du Martin-pêcheur (*Alcedo atthis*) est également à relever. L'espèce qui souffre beaucoup des travaux d'aménagement réalisés sur les cours d'eau, trouve incontestablement un biotope de substitution important dans les gravières. Moins pionnière que l'Hirondelle de rivage, elle peut s'y maintenir plus longtemps, mais tôt ou tard, si les microfalaises où elle niche ne sont pas rajeunies, le site est abandonné.



Photo 14. Le Martin-pêcheur (*Alcedo atthis*), une espèce fréquente dans les gravières (J.-F. Dejonghe).

Les espèces nichant dans des milieux sablo-graveleux humides

Dans ce groupe, on mentionnera deux espèces, fréquemment nicheuses dans les gravières.

Il y a d'abord la Bergeronnette grise (*Motacilla alba*), espèce à large écologie commune en France. Avec le Petit Gravelot (*Charadrius dubius*), nicheur rare en France, on aborde une des espèces « historiques » les plus favorisées par les gravières, qui sont incontestablement à l'origine de son actuelle progression. Le problème qui se pose pour cette espèce est celui des milieux pionniers en général. En effet, elle ne peut se maintenir que sur les gravières jeunes ou artificiellement rajeunies. Ainsi le Petit Gravelot disparaît-il des gravières les plus anciennes et les plus végétalisées, alors que ses effectifs sont élevés sur les carrières en cours d'exploitation ou très récemment remises en état.

Les espèces nichant préférentiellement dans des prairies humides

Dans ce groupe écologique, l'espèce la plus fréquente sur gravières est le Vanneau huppé (*Vanellus vanellus*), nicheur assez commun en France, mais en forte régression. Ce sont les gravières récentes qui jouent un rôle de soutien des effectifs pour cette espèce. On remarque d'ailleurs que les espèces de ce groupe régulièrement rencontrées sur carrières sont capables d'exploiter des friches à la place de prairies humides. Outre le Vanneau huppé, c'est également le cas du Cisticole des joncs (*Cisticola juncidis*) ou du Pipit farlouse (*Anthus pratensis*). Les espèces étroitement inféodées aux prairies humides (Courlis cendré, Râle des genêts, Traquet tarier...) sont apparemment absentes des carrières.

Les espèces nichant préférentiellement dans de hautes herbes humides ou de jeunes saulaies

Ce groupe se compose d'espèces aux exigences écologiques voisines qui sont assez communes à communes en France. Sur les gravières, l'espèce la plus couramment rencontrée est le Bruant des roseaux (*Emberiza schoeniclus*), mais plusieurs autres espèces sont assez fréquentes : Phragmite des joncs (*Acrocephalus schoenobaenus*), Bouscarle de Cetti (*Cettia cetti*), Locustelle tachetée (*Locustella naevia*), Rousserolle verderolle (*Acrocephalus palustris*)...

Manifestement, ces espèces bénéficient des carrières, sur lesquelles elles peuvent s'installer assez rapidement. Cependant si ce groupe colonise volontiers les gravières, les espèces qui le composent n'en dépendent pas étroitement, une partie majeure des effectifs étant située dans d'autres types de milieux (friches et prairies humides, bordures de fossés, cours d'eau et étangs...).

Les espèces des boisements humides

Ce groupe est essentiellement représenté sur les gravières par deux rapaces, le Milan noir (*Milvus migrans*) et le Faucon hobereau (*Falco subbuteo*) ainsi que par des hérons : Héron cendré (*Ardea cinerea*), Bihoreau gris (*Nycticorax nycticorax*), Aigrette garzette (*Egretta garzetta*)... On ajoutera le Grand Cormoran (*Phalacrocorax carbo*), nicheur peu fréquent sur les carrières mais qui peut y installer localement d'importantes colonies.

Aucune de ces espèces n'est nicheuse commune en France, cependant il s'agit toutes d'espèces actuellement en progression. Les îles boisées des gravières favorisent sans aucun doute les Hérons et le Grand Cormoran.

En ce qui concerne le Grand Cormoran il faut considérer que malgré une forte progression, l'espèce reste un nicheur rare dans notre pays, avec environ 3 000 couples ; les fameuses « invasions » de cormorans concernent les oiseaux hivernants. Le Milan noir est attiré par les Ardéidés au sein desquels il aime nicher. Le Faucon hobereau, n'est pas à proprement parler une espèce de zones humides, mais en carrière il niche dans les boisements humides et est attiré par les hirondelles chassant au-dessus des plans d'eau dont il fait son ordinaire.

Les espèces exploitant des milieux minéraux secs

Certaines espèces profitent de la présence dans les carrières de milieux minéraux, indépendamment du fait qu'il y ait des plans d'eau ou des zones humides. Ces espèces se rangent dans deux catégories :

- Espèces nichant dans des terriers : Huppe fasciée (*Upupa epops*), Guêpier d'Europe (*Merops apiaster*), Moineau soulcie (*Petronia petronia*) ;
- Espèces nichant dans des « steppes » à herbe rase : Cochevis huppé (*Galerida cristata*), Traquet motteux (*Enanthe aenanthae*), Oedicnème criard (*Burhinus oedipnemus*), Alouette lulu (*Lullula arborea*), Pipit rousseline (*Anthus campestris*).

Toutes ces espèces sont des nicheurs peu communs à rares en France.

1.5.3. LES OISEAUX MIGRATEURS ET HIVERNANTS

Le rôle des gravières pour les oiseaux migrants et hivernants est significatif même s'il est surtout dévolu aux plus grandes d'entre elles. Différents paramètres interviennent dans la richesse spécifique et l'abondance des oiseaux : l'accessibilité à la nourriture, l'ouverture du milieu, la tranquillité, le climat hivernal (plans

Photo 15. Chevalier guignette (*Actitis hypoleucos*) en passage migratoire sur une grève argileuse d'une gravière du Sud-Ouest (CNC - ECTARE).



Photo 16 et 16b. Le Grand Cormoran (*Phalacrocorax carbo*) est un hivernant régulier des plans d'eau (J.-F. Dejonghe).



FIG. 13. Le Crapaud calamite (*Bufo calamita*), un amphibien caractéristique des petites mares sans végétation. (dessin : M. Pajard).



sine des marais, chevaliers, bécasseaux...), les Ardéidés (= hérons)...

- 3) Les grandes roselières utilisées par des espèces rares comme le Butor étoilé, le Butor blongios, la Panure à moustaches, le Busard des roseaux, etc., et qui peuvent abriter des dortoirs de passereaux paludicoles ou non (hirondelles, bergeronnettes, bruants, fauvettes...).

1.5.4. LES AMPHIBIENS

Les Amphibiens que l'on rencontre le plus fréquemment dans les carrières en eau appartiennent essentiellement à deux groupes.

Il y a le groupe des espèces peu exigeantes, vivant dans différents milieux terrestres et se satisfaisant de pratiquement tout type de plans d'eau pour la reproduction. Il s'agit du Crapaud commun (*Bufo bufo*), de la Grenouille verte (*Rana kl. esculenta*), de la Grenouille rousse (*Rana temporaria*), du Triton palmé (*Triturus helveticus*)...

L'autre groupe est beaucoup plus caractéristique des carrières et se compose d'espèces beaucoup moins fréquentes. Ce sont des espèces pionnières qui se reproduisent dans des petites mares ou flaques à substrat minéral (sables, graviers) peu ou pas végétalisées. La plus fréquente est le Crapaud calamite (*Bufo calamita*) espèce dont on sait qu'elle bénéficie largement des carrières. Mais on rencontre aussi régulièrement le Pélodyte ponctué (*Pelodytes punctatus*), le Crapaud accoucheur (*Alytes obstetricans*) et même le Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata*).

En revanche, un troisième groupe, formé d'espèces plus exigeantes (Triton marbré, Triton crêté, Triton alpestre, Salamandre...), recherchant des petits plans d'eau peu profonds et des mares souvent temporaires – poissons rares ou absents, est mal représenté sur les carrières, où ces milieux font fréquemment défaut. ■

d'eau gelés ou non), la localisation géographique sur un axe migratoire plus ou moins important...

On distinguera trois milieux phares dans l'accueil migratoire et hivernal des oiseaux.

- 1) Les grands plans d'eau tranquilles, qui accueillent des effectifs parfois très importants d'Anatidés, de Grèbes, de Foulques, de Plongeurs, de Cormorans...
- 2) Les grèves et « vasières » fréquentées parce qu'on appelait autrefois les « échassiers », à savoir les Limicoles (Vanneau huppé, Bécas-

Fixer des objectifs précis

Entre le moment où naît l'idée de proposer un aménagement écologique pour une carrière et la mise en œuvre de ce projet, trois grandes étapes sont nécessaires.

1. **Le lancement de la démarche de réflexion** avec différents partenaires, réflexion amenant chacun à émettre ses préférences pour tel ou tel type de réaménagement et à les motiver ; cette étape, que nous appelons « démarche décisionnelle » doit aboutir (quel que soit d'ailleurs le type de réaménagement envisagé) à proposer une vocation cohérente pour le site, au sein de laquelle les fonctions écologiques prendront une part plus ou moins grande ; elles pourront être prioritaires (aménagement 100 % écologique) ou cohabiter avec d'autres fonctions, auquel cas la compatibilité de ces autres fonctions avec les aménagements écologiques devra être soulevée.
2. Pour mettre sur pied un projet d'aménagement écologique réaliste et efficace, **une bonne connaissance du site d'exploitation est indispensable** en particulier sur trois thèmes clefs : caractéristiques du gisement et du mode d'exploitation, hydrologie (eaux de surface) et hydrogéologie (eaux souterraines) et écologie (du site lui-même, de ses abords et de la région naturelle dans laquelle il s'inscrit). Ces données se trouvent dans l'étude d'impact dans le cas idéal ou le projet a été solidement conçu avant l'exploitation, mais peuvent donner lieu à des expertises complémentaires lorsque la carrière existe déjà au moment du choix d'un aménagement écologique.
3. Connaissant la vocation globale du site à aménager et muni des informations indispensables (caractéristiques du gisement, hydrologie, écologie...), on peut et on doit **fixer des objectifs écologiques précis**. La nécessité de cette étape étant apparue plus récemment que celle des deux premières, ce guide fournit en annexe une méthodologie inédite destinée à fixer des objectifs écologiques précis à différents niveaux : fonctionnement des écosystèmes, habitats et espèces.

Le schéma ci-dessous illustre une démarche complète menant des prémisses de la réflexion jusqu'à l'établissement du plan d'aménagement. Les trois étapes de la *démarche décisionnelle* correspondent aux encadrés 2, 3 et 4.

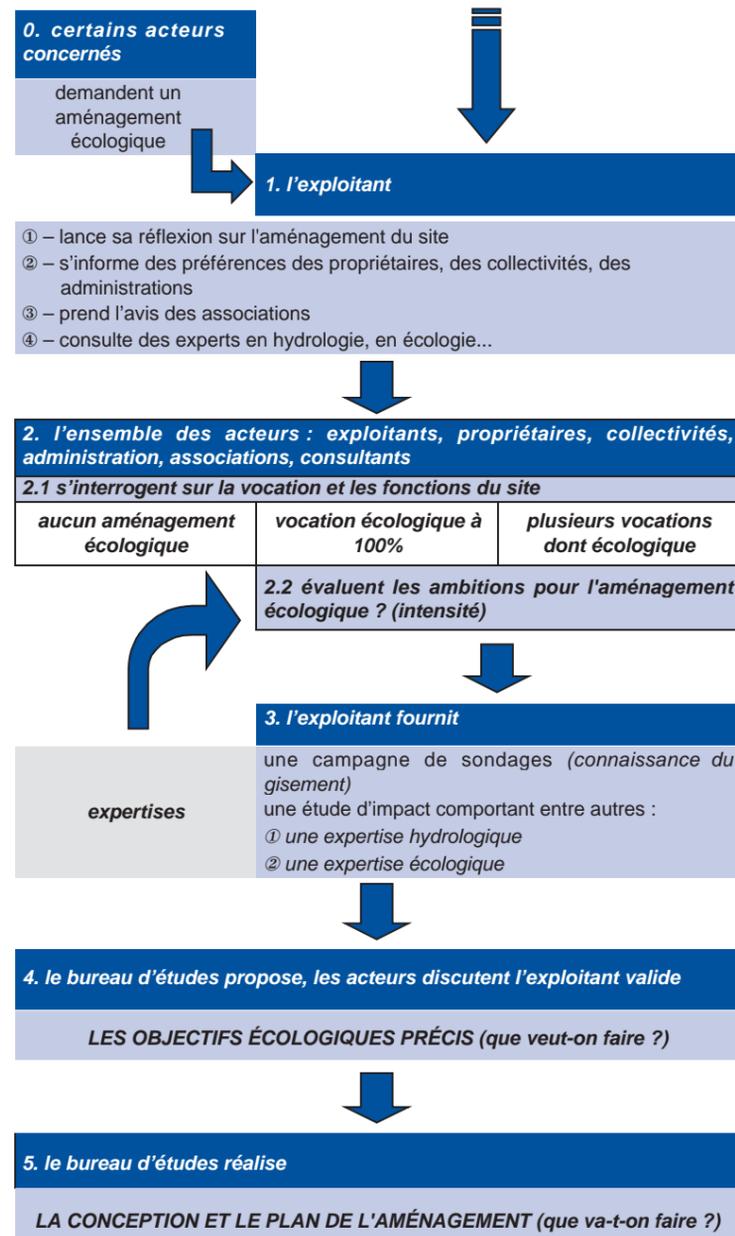


FIG. 14.– Démarche à suivre depuis les premières réflexions jusqu'à la conception du plan d'aménagement.

2.1. La démarche décisionnelle et son contexte

Depuis 1971, la réglementation oblige à aborder la question de l'après carrière dès le stade de la demande d'autorisation d'exploitation. Depuis 1979, au chapitre V de *l'étude d'impact*, on doit décrire avec précision les travaux d'aménagement, d'autant que ceux-ci sont engagés bien avant

« l'abandon » du site, sur les zones parvenues en fin d'exploitation : la remise en état est *coordonnée à l'exploitation*. Les coûts de la remise en état programmée doivent également être évalués et des garanties financières doivent être apportées.

La première étape à mettre en œuvre pour mener à bien un aménagement, écologique ou non, est de décider des fonctions que le site remplira quand il aura été aménagé et restitué. C'est alors que l'on décidera si parmi elles, la fonction écologique est retenue et si elle est prioritaire ou subordonnée à d'autres fonctions. On pourra alors présenter une *vocation du site*, regroupant autour d'un projet cohérent, un ensemble de fonctions compatibles.

Dans ce chapitre, on analyse le contexte dans lequel une telle démarche se déroule et les questions qu'elle soulève. Pour aider à la prise de décision, lorsqu'un aménagement écologique est envisagé, sont abordés d'une part les motivations pouvant amener à un tel choix, d'autre part la compatibilité plus ou moins grande d'autres vocations avec les fonctions écologiques.

2.1.1. METTRE EN ROUTE UNE DÉMARCHÉ DE RÉFLEXION

Il est vrai qu'il n'est pas toujours facile de fixer la destination d'un site. Les considérations foncières, politiques, administratives, etc., obligent bien souvent à des négociations complexes et la recherche d'un compromis est inévitable. Pourtant, avoir défini clairement, dès l'amont, un projet cohérent en termes de vocation, permet d'aborder les phases de négociations avec un discours plus net et par-là plus convaincant.

Les acteurs de la démarche

La première démarche consiste donc à s'interroger sur la vocation future du site. Généralement à l'instigation de l'exploitant, un certain nombre d'intervenants responsables vont devoir entrer dans un processus de réflexion. Les acteurs de cette réflexion sont donnés dans le tableau I ci-dessous. Tous n'ont pas le même rôle : certains ont un pouvoir de décision (exploitants, propriétaires, collectivités, administrations), d'autres un rôle de consultation (associations et bureaux d'études). Cependant, en dernière analyse, c'est l'exploitant qui est responsable des choix d'aménagement et c'est lui qui sera titulaire de l'autorisation et chargé des obligations de remise en état.

Quelle(s) fonction(s) pour le site ?

La démarche de réflexion doit, après débats et échanges, répondre à la question « quelle vocation pour le site ? ». Pour y répondre, on s'interrogera sur les *fonctions* que le site peut remplir,

TABLEAU I.– Les acteurs d'un projet d'aménagement écologique.

Acteurs ayant un pouvoir de décision	
Exploitant(s) Propriétaire(s) Collectivités territoriales	Commune (maire, conseil municipal, services environnement & espaces verts) Structures intercommunales diverses (syndicats, PNR, etc.) Département (conseil général et ses services environnement) Région (conseil régional et ses services environnement)
Administrations de l'État	DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement) DDAF (Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt) autres administrations : DDE, DDASS, Service de la Navigation...
Acteurs ayant un rôle de conseil	
Associations	De protection de la nature et de l'environnement De chasse et de pêche
Bureaux d'Études et autres consultants	Géomètres, hydrologues, hydrogéologues, écologues, paysagistes...

c'est-à-dire sur les services qu'il peut rendre à la collectivité en général ainsi qu'à la population locale et à ses futurs usagers.

Parmi les fonctions du site, il faut distinguer ce qui est souhaitable de ce qui est possible. Dans ce qui est *souhaitable*, il y a :

- 1) ce qui relève des opportunités que le site présente objectivement,
- 2) ce qui dépend des motivations de chacun.

Par exemple on décidera de faire un aménagement écologique sur un site parce que la commune le souhaite et/ou parce qu'il est bordé par une zone humide d'intérêt...

Fonctions non spécifiquement écologiques

Régulation des crues
Stockage d'eau potable
Lagunage : dépollution d'eaux chargées en nitrates, en phosphates, en matières organiques, en métaux lourds...
Productions agricoles, piscicoles, sylvicoles
Paysage, promenade, espace vert
Loisirs nautiques
Chasse, pêche

Fonctions spécifiquement écologiques

Reconnexion hydraulique d'annexes fluviales (participation à la renaturation de la vallée)
Accueil d'espèces peu fréquentes aux plans local et régional
Accueil de nombreuses espèces des milieux humides

TABLEAU II.– Exemples de fonctions possibles pour une carrière en eau.

Pour évaluer ce qui est *possible*, il faut pouvoir cerner les contraintes :

- ⇒ contraintes sociales (opinion locale...)
- ⇒ contraintes foncières (propriétaires, servitudes, POS...)
- ⇒ contraintes économiques (coût du projet, valorisation et gestion du site...)
- ⇒ contraintes physiques (taille du site, matériaux disponibles, fonctionnement hydrologique...)
- ⇒ contraintes écologiques (localisation, environnement biologique, pollutions...)

On fera également attention à évaluer la faisabilité dans le temps, c'est-à-dire à envisager la gestion du site après obtention par l'exploitant du « quitus d'abandon » (officiellement appelé *Procès Verbal de Récolement*).

Réflexion concernant l'aménagement écologique
À partir de maintenant, nous supposons que le projet prévoit un caractère totalement ou partiellement écologique pour le site à aménager : fonction de soutien à la biodiversité, fonction de reconnexion hydrique, de dépollution...

Les promoteurs du projet doivent répondre à deux questions essentielles pour la suite :

- 1) la zone écologique sera-t-elle viable : taille suffisante et compatibilité avec les autres vocations ?
- 2) qui assurera la gestion ultérieure du site et celle-ci sera-t-elle compatible avec une vocation « écologique » ?

On peut en effet envisager **des ambitions plus ou moins fortes pour les aménagements écologiques** :

- ⇒ ambition forte (ex. : projet ambitieux de création de zone humide d'intérêt avec mesures foncières garantissant une gestion par des personnes compétentes).
- ⇒ ambition assez forte (ex. : aménagement écologique soigné puis gestion assurée par des personnes motivées - commune, propriétaire... - mais sans garantie à long terme).
- ⇒ ambition moyenne (ex. : vocation écologique partagée avec une autre vocation : cynégétique, loisirs, stockage d'eau...).
- ⇒ ambition faible (éléments d'aménagement écologique ponctuels dans un site ayant une autre vocation prioritaire : base de loisirs, reboisement...).

2.1.2. LES MOTIVATIONS POUR UN PROJET D'AMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE ?

Les aspects « motivations » sont toujours importants pour la réussite d'un projet. Elles dépendent en grande partie du statut de chacune des parties prenantes.

■ LES MOTIVATIONS DE L'EXPLOITANT DE CARRIÈRE, PRODUCTEUR DE GRANULATS

Le producteur de granulats, quelles que puissent être les interventions des autres parties prenantes, reste moteur dans la décision d'un aménagement écologique, parce que c'est lui qui dépose la demande d'exploitation, que c'est lui qui réalise et se porte garant du financement des travaux et que c'est lui qui a la maîtrise foncière des terrains.

Un projet de qualité

L'aménagement écologique est de plus en plus perçu par l'opinion et les administrations comme un investissement supplémentaire que l'exploitant consent pour la valorisation d'un site. D'autre part, on sait que face aux impacts environnementaux de la carrière, l'exploitant doit prévoir des mesures de suppression, de réduction ou de compensation. On trouve fréquemment au sein de ces mesures des dispositions écologiques. Mais un exploitant qui va jusqu'à l'aménagement écologique, signifie par-là qu'il entend aller au-delà de la simple remise en état.

Un projet bénéfique à l'image de l'entreprise

La création d'une zone humide écologique peut venir de l'entreprise elle-même ou répondre à des demandes de valorisation écologique émanant des administrations spécialisées (DIREN, DRIRE, DDAF), des élus locaux, des associations de protection de l'environnement... De toute façon, elle est l'occasion pour l'entreprise de pro-

mouvoir son image de marque. En termes de relations publiques et de bénéfices promotionnels, les retombées sont très variées, à condition cependant (1) de mettre toutes les chances de son côté pour aboutir à un succès, (2) de le dire et de le faire savoir. L'entreprise améliore son image et sa communication avec le monde associatif en l'informant ou en le consultant dès les phases de conception. Les aménagements écologiques sont populaires dans une grande partie de l'opinion. L'entreprise pourra faire connaître ses réalisations par des panneaux installés sur le site, par des plaquettes promotionnelles, par l'organisation de visites guidées (scolaires en particulier)...

Un projet interne à l'entreprise

Le personnel d'une société d'exploitation de granulats sera en général satisfait des efforts de son entreprise en faveur de l'environnement, à condition qu'il soit tenu au courant et associé à la démarche. Ceci est d'autant plus vrai dans un secteur industriel dont l'image environnementale a été brouillée dans l'opinion.

Pour les personnes amenées à travailler de près au projet, l'expérience d'ores et déjà acquise en ce domaine en France et en Grande-Bretagne, montre que leur motivation est plus grande à réaliser un aménagement écologiquement utile qu'une remise en état classique. L'aspect de formation à de nouvelles techniques n'est pas non plus à négliger, en particulier en ce qu'il a de valorisant pour les personnes concernées.

■ LES MOTIVATIONS DES AUTRES ACTEURS DU PROJET

D'autres acteurs interviennent dans le processus de prise de décision. Ils peuvent être spontanément demandeurs d'une remise en état à vocation écologique ou doivent au contraire être convaincus par ceux qui portent le projet. Les principales motivations des « autres acteurs » sont énumérées ci-dessous.

Les motivations possibles pour les propriétaires

- ⇒ faire de leur propriété une zone d'intérêt écologique et scientifique.
- ⇒ souhaiter pour des raisons d'origine esthétique et paysagère, un site d'aspect naturel.
- ⇒ valoriser leur propriété en domaine de chasse ou de pêche (ces activités doivent cependant rester limitées pour être compatibles avec des objectifs biologiques).
- ⇒ créer un site susceptible d'être valorisé dans le cadre du tourisme vert.

Les motivations possibles pour les collectivités territoriales

- ⇒ en zone périurbaine : créer ou étoffer des

zones vertes, participer à un réseau de corridors verts et répondre aux aspirations de qualité de vie exprimées par les populations urbaines.

- ⇒ en zone rurale mais exploitée intensivement, créer des zones naturelles (en particulier des zones humides peu fréquentes dans ce type de paysage).
- ⇒ en zone rurale, développer les atouts écologiques et le patrimoine paysager dans une perspective touristique.
- ⇒ en zone périurbaine : promouvoir l'idée de coexistence entre une forte densité de population et des zones naturelles de qualité, celles-ci pouvant avoir un rôle pédagogique.

Les motivations possibles pour les administrations et associations concernées par la protection de l'environnement

- ⇒ aménagement écologique entendu comme une compensation aux importantes modifications induites par l'extraction.
- ⇒ compatibilité de l'aménagement avec les prescriptions / recommandations de divers documents d'urbanisme et de gestion du territoire (Schémas Directeurs d'Aménagement et d'Urbanisme, Schéma Départemental des Carrières, Chartes des Parcs Naturels Régionaux, SDAGE, SAGE⁽¹³⁾...).
- ⇒ localisation du site dans un secteur connu pour la valeur écologique de ses milieux.
- ⇒ inversement, localisation du site dans un secteur déficitaire en zones humides de qualité.
- ⇒ caractéristiques du site (hydrologie, substrat, superficie...) favorables à la création de milieux naturels de valeur patrimoniale.
- ⇒ localisation du site sur un axe migratoire majeur favorable à l'installation ou au stationnement de divers oiseaux.

2.1.3. LA COMPATIBILITÉ DE L'AMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE AVEC D'AUTRES VOCATIONS POSSIBLES

Sur un site donné, surtout s'il est de grande taille, la question d'une vocation plurielle se pose généralement. Cependant il faut faire attention à ce que l'éparpillement des fonctions - un peu de loisirs, un peu d'écologie, un peu de paysage, etc. - ne conduise à un site sans vocation réelle ni personnalité.

Quoi qu'il en soit, puisque des sites polyvalents répondent à une réelle demande, autant s'interroger sur la coexistence des différents types d'aménagement. Dans le cadre de ce guide consacré aux aménagements écologiques, la question pertinente est celle de la compatibilité

d'autres aménagements avec l'aménagement écologique.

■ AMÉNAGEMENTS PEU COMPATIBLES AVEC LES FONCTIONS ÉCOLOGIQUES

Il s'agit d'aménagements « lourds » avec utilisation intensive de l'espace carrière se traduisant par une artificialisation importante des milieux. La prise en compte des milieux naturels ne pourra se réduire qu'à des aspects marginaux : choix des plantations, conservation de quelques corridors ou milieux ponctuels (haies, fossés, mares...), traitement naturel des espaces paysagés (utilisation d'espèces autochtones)... Citons par exemple :

- ⇒ les aménagements touristiques et ludiques avec forte fréquentation : création d'une base de loisirs nautiques au sens le plus sophistiqué du terme, golf, création d'un camping équipé, implantation de cabanons de villégiature...
- ⇒ les valorisations industrielles : bassins de lagunage, exploitation en centre de stockage des déchets... Les bassins de lagunage peuvent cependant avoir un intérêt pour l'avifaune (création d'îlots ou pose de radeaux).
- ⇒ les projets d'urbanisme : lotissement, Zone d'Aménagement Concerté etc. : quand le plan d'eau n'est pas remblayé, il devient l'élément fédérateur autour duquel s'organise le plan d'urbanisme. Son attractivité en fait nécessairement un lieu fréquenté et dérangé. Cependant des traitements écologiques peuvent être pratiqués à la marge.
- ⇒ les valorisations agroalimentaires : remblaiement pour remise en culture, pisciculture...
- ⇒ la production intensive de bois : peupleraies très entretenues, plantations denses de conifères...

■ AMÉNAGEMENTS PARTIELLEMENT COMPATIBLES AVEC LES FONCTIONS ÉCOLOGIQUES

Certaines valorisations économiques des carrières supposent une utilisation plus ou moins intensive de l'espace aménagé ne se traduisant pas nécessairement par une totale artificialisation. À titre d'exemples, on peut citer les cas suivants :

- ⇒ les reboisements à vocation productive avec entretien semi-intensif : le boisement jouera spontanément son rôle écologique ; l'optimisation des fonctions écologiques peut passer par le choix des essences, par le traitement des lisières... Cependant, les reboisements sont loin de constituer la solution optimale en matière de biodiversité des zones humides.

⁽¹³⁾ Les SDAGE (Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) concernent chacun des 6 grands bassins français, tandis que les SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux), encore peu répandus, concernent des sous-bassins. Ces deux types de documents émanent de la Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'Eau.

- ⇒ les valorisations halieutiques relativement poussées : alevinage, fertilisation des plans d'eau... ; ce type d'aménagement n'empêche pas l'implantation d'une végétation de zones humides, la création d'îlots, etc. Cependant l'objectif est ici une production maximale de poissons, or les espèces planctonivores et phytophages (Cyprinidés), lorsqu'elles sont en grand nombre, font régresser les macrophytes aquatiques et riverains et entrent en forte concurrence avec les oiseaux d'eau, les amphibiens ou les larves de libellules. On notera d'ailleurs que l'enlèvement des poissons est l'une des techniques d'amélioration de la biodiversité des plans d'eau eutrophes.
- ⇒ les valorisations cynégétiques : si la chasse n'est pas le mode de gestion recommandée pour valoriser la biodiversité d'une zone humide (mortalité, dérangement, fréquentation, introduction d'animaux d'élevage, problèmes liés à l'ingestion de plombs par les oiseaux d'eau...), elle n'empêche pas les aménagements écologiques. Cependant, la compatibilité entre les loisirs cynégétiques et les fonctions écologiques dépend beaucoup de la pression de chasse exercée. D'autre part, il faut noter que l'engraissement excessif des étangs pratiqué pour certaines chasses peut entrer en conflit avec des objectifs écologiques en conduisant à une eutrophisation des eaux.

(14) Pour ces deux expertises, on trouvera en annexe des précisions sur la nature des données à recueillir.

(15) Adapté d'après ANDREWS J. & KINSMAN D. – *Gravel pit restoration for wildlife. A practical manual*. 1990 – Tarmac Quarry Products, RSPB.

2.2. Évaluer les opportunités et les contraintes du site

La décision de réaliser un aménagement écologique, quelle qu'en soit l'ambition, doit se traduire en objectifs clairs et précis. Pour cela on a besoin d'informations, dans différents domaines, dont certains plus essentiels que d'autres. Les données à réunir sont abordées dans ce qui suit sous 4 rubriques :

- ⇒ les caractéristiques du gisement et le mode d'exploitation
- ⇒ l'expertise hydrologique et hydrogéologique⁽¹⁴⁾
- ⇒ l'expertise écologique⁽¹⁵⁾
- ⇒ les autres données et informations intervenant dans la nature des objectifs et relevant de domaines divers.

Toutes les informations pourront être analysées en termes :

- 1) *d'opportunités*, c'est-à-dire de circonstances permettant une meilleure valorisation écologique du site.
- 2) *de contraintes*, autrement dite de réalités incontournables limitant certains aspects du projet.

TABLEAU III. – Définition des différentes granulométries des substrats.

Système internat.	Diamètre des particules	nbe approx. de partic./g	Surf. approx. cm ² /g	Visibilité des particules	Aspect au toucher	Composition minérale
Sable grossier	0,2 - 2,0 mm	5,4.10 ²	21	à l'œil nu	meuble et granuleux ni plastique, ni collant	quartz
Sable fin	0,02 - 0,2 mm	5,4.10 ⁵	210	à l'œil nu	meuble et faiblement granuleux	quartz, feldspaths, ferromagnésiens
Limon	0,002 - 0,02 mm	5,4.10 ⁸	2 100	microscope	doux et soyeux faiblement cohérent	quartz feldspaths ferromagnésiens, mica, argiles
Argile	< 0,002 mm	7,2.10 ¹¹	23 000	microscope électronique	humide : collant et plastique sec : dur et cohérent	surtout argiles avec un peu de quartz

2.2.1. LES CARACTÉRISTIQUES DU GISEMENT ET LE MODE D'EXPLOITATION

Les caractéristiques propres au gisement doivent être connues avec le plus de précision possible car elles sont déterminantes pour l'aménagement. Généralement, l'exploitant a déjà fait réaliser une campagne de sondages afin d'évaluer l'intérêt économique du gisement. Si la densité de ces sondages est trop faible, il faudra envisager de faire compléter la campagne. En effet, les caractéristiques du gisement exploitable et des couches de découverte seront d'autant plus utilisables qu'elles seront précises.

■ Nature des matériaux

En ce qui concerne la nature des matériaux, les travaux d'aménagement n'ont pas besoin des données géotechniques relevant de la valorisation du gisement. On s'intéresse surtout à leur granulométrie (proportion d'argile, de limons, de sables, de graviers) et à leur composition, plutôt calcaire ou plutôt siliceuse. À cet égard, les propriétés de la couche stérile sont plus importantes encore que celles du matériau exploité puisque c'est elle qui fournira l'essentiel des remblais.

La présence de particularités dans le gisement peut intéresser l'aménagement. C'est le cas par exemple :

- ⇒ de lentilles argileuses.
- ⇒ de passages tourbeux.
- ⇒ de blocs rocheux (grès, calcaire...).

La couche supérieure, riche en matière organique et humus, appelée « terre végétale », peut être de nature diverse. Sa texture, argileuse, argilo-limoneuse, argilo-sableuse... est un élément important pour apprécier sa fertilité (qui rappelons-le n'est pas nécessairement un atout dans le cas des aménagements écologiques). Son pH est une information importante facile à mesurer sur place. Dans les secteurs très engorgés, la matière organique se décompose lentement. On se trouve alors en présence de couches humifères particulières : paratourbeuse (*anmoor*) lorsqu'il y a un assèchement estival, tourbeuse quand l'eau stagne en permanence. Les végétaux adaptés à ces sols ont souvent un intérêt patrimonial.

Il sera intéressant de localiser les zones où la couche supérieure est particulière (très sableuse, paratourbeuse, tourbeuse...) en vue de pratiquer éventuellement des décapages sélectifs. On pourra ainsi réutiliser ces substrats particuliers pour réaliser des aménagements originaux.

■ Délimitation des zones inexploitable

Il existe fréquemment au sein des gisements des secteurs qui ne valent pas la peine d'être exploités. C'est le cas par exemple de passées argileuses dans les sables et graviers. Il est préférable de pouvoir localiser ces zones à l'avance, plutôt que de les découvrir en cours d'exploitation. En effet, cela permet de les mettre à profit dans le plan d'aménagement pour la création d'îles, d'îlots, de presqu'îles, de hauts-fonds...

■ Données concernant la puissance des couches

La donnée la plus basique consiste en une évaluation de la puissance moyenne du gisement exploitable et de la couche stérile. Elle permet d'évaluer la profondeur de l'excavation et la quantité de matériaux de remblai disponibles.

Cependant, lorsque l'on dispose d'un maillage suffisamment dense de sondages, on peut affiner ces données selon les secteurs et se faire une idée de la profondeur et de la topographie du fond de fouille à l'issue de l'extraction. Ceci permet en particulier de localiser les zones à remblayer (hauts-fonds, îles) là où l'excavation sera la moins profonde. On réalise ainsi une économie de remblais.

■ Données concernant la fertilité de la terre végétale

La fertilité de la terre végétale est un paramètre important dans le cadre des remises en état. Si dans les aménagements de type agricole, sylvicole ou paysager classique, on veille à conserver cette fertilité, dans les aménagements écologiques on est plus souvent confronté à un excès de richesse des sols, entraînant une banalisation de la flore. Quoi qu'il en soit, une analyse de la fertilité de la terre végétale est souhaitable. En général, il est préconisé d'analyser séparément les couches 0-30 cm et 30-60 cm. Si leurs caractéristiques sont nettement différentes, on pourra alors envisager un décapage en deux passes de la terre végétale.

Les trois éléments fondamentaux étant l'azote, le phosphore et le potassium, les paramètres basiques à mesurer sont les suivants :

- pH et conductivité
- phosphate extractible
- azote minéralisable
- pour les sols acides, ammonium (NH₄⁺) disponible
- pour les sols neutres ou alcalins, nitrates (NO₃⁻) disponible
- potassium assimilable

Le mode d'exploitation

Le phasage de l'extraction, dans le temps et l'espace, est la première information indispensable, car c'est sur lui que se calera la progression de l'aménagement.

Ce phasage peut d'ailleurs éventuellement tenir compte ou évoluer en fonction des objectifs d'aménagement.

Deux autres données sont importantes quant à la définition des objectifs.

- D'abord, il faut prévoir si l'exploitation doit être réalisée avec un rabattement de nappe, total ou partiel. Bien que l'administration soit réticente à donner des autorisations de rabattement de nappe, il faut savoir que ce mode d'exploitation permet de réaliser des travaux de remblaiement plus précis parce qu'ils se font à sec. Les remblais en eau sont beaucoup plus difficiles à contrôler avec précision. Le rabattement partiel pour l'aménagement est une solution particulièrement adaptée.
- D'autre part, si les matériaux sont lavés sur place, cela conduira à la production de fines de décantation, matériaux argileux qui peuvent être très utiles dans les aménagements, en particulier pour la création de "vasières", de "queues d'étang", de roselières...

Les opportunités et les contraintes

Les principaux éléments traduisibles en termes d'opportunités ou de contraintes et susceptibles d'orienter les objectifs sont à mettre en évidence.

- 1) le rapport entre le gisement exploitable et les terres de découverte qui donne un premier aperçu des capacités de remblaiement dont on disposera.
- 2) les caractéristiques de la découverte qui formera le substrat dominant du futur site : texture, pH, richesse nutritive des sols ; ces données permettent de se faire une idée des grandes catégories de milieux que l'on sera en mesure de mettre en place.
- 3) la présence de substrats particuliers et originaux est fréquemment à l'origine d'opportunités, qui pourront se traduire par la création de milieux originaux.
- 4) la présence de sols⁽¹⁶⁾ évolués particuliers peut conduire à envisager leur **analyse pédologique** (en plaine alluviale, les sols sont généralement peu évolués et l'étude pédologique sera rarement nécessaire ; en revanche, le cas est plus fréquent pour les carrières de roches massives qui peuvent concerner des sols particuliers : rendzines, podzols...).

2.2.2. LES OPPORTUNITÉS ET LES CONTRAINTES HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

L'expertise hydrologique et hydrogéologique est indispensable car le facteur « eau » arrive en tête des causes de réussite ou d'échec de la création des zones humides. Pouvoir prévoir et/ou contrôler les niveaux d'eau constitue la pierre de touche de la réussite. On trouvera en annexe des données complémentaires permettant de préciser le cadre de l'expertise hydrologique : bilan hydrique et qualité des eaux.

Le bureau d'études chargé de proposer des objectifs, cherchera dans les données hydrologiques et hydrogéologiques des opportunités à mettre en valeur. Il devra aussi en respecter les contraintes. La liste des questions auxquelles l'étude hydrologique et hydrogéologique doit absolument répondre dans le cas de l'élaboration d'un projet d'aménagement écologique est celle-ci :

- 1) la gravière pourrait-elle techniquement (sans se préoccuper à ce stade des contraintes foncières ou réglementaires) être intégrée au fuseau de liberté du cours d'eau ?
- 2) quels types de connexions existent déjà ou pourraient être restaurées entre la carrière et le réseau hydrographique : il faut résumer les liens longitudinaux (relations directes avec des cours d'eau), latéraux (inondabilité du site) et verticaux (relations avec la nappe) ? Ces paramètres sont de première importance pour savoir à quelle catégorie de zone humide on peut prétendre.
- 3) de quel principal type l'alimentation hydrique des plans d'eau sera-t-elle ? aura-t-on affaire à un battement particulièrement fort de la nappe ? et généralement toutes les conclusions sur les aspects remarquables du bilan hydrique et de son hypodermis sont de nature à éclairer le choix des objectifs.
- 4) y a-t-il des sources de pollution agricole, urbaine, industrielle particulièrement préoccupantes voire difficilement évitables ; il est évident que les objectifs devront tenir compte de telles contraintes (par exemple en fixant comme un des objectifs majeurs, la création de milieux dépolluants comme les roselières).

2.2.3. LES OPPORTUNITÉS ET LES CONTRAINTES ÉCOLOGIQUES

L'expertise écologique est généralement menée à l'occasion de l'étude d'impact. En matière d'écologie, cette dernière a d'abord pour vocation d'évaluer les risques du projet vis-à-vis des habitats et des espèces. Mais dans le cas d'un aménagement écologique, il faut aussi lui assi-

gner la mission de servir la réflexion sur les objectifs de l'aménagement.

On trouvera en annexe des précisions sur les données écologiques utiles pour l'élaboration d'un aménagement à vocation naturelle. Là encore, il est efficace de raisonner en termes d'opportunités et de contraintes.

Notons seulement ici que les données concernent autant l'inscription du site dans son cadre régional et micro-régional (échelle de la petite région naturelle) que son insertion dans son milieu environnant. C'est pourquoi, il nous semble utile d'organiser les données écologiques disponibles à trois échelles géographiques emboîtées :

- 1) la **région** dont la définition peut être variable mais qui peut souvent correspondre à une région administrative (sauf pour de grandes régions hétérogènes comme Rhône-Alpes, PACA, ou Midi-Pyrénées).
- 2) la « **petite région naturelle** » qui peut correspondre à un terroir comme le Forez, le Perthois, la Thiérache, la Bigorre etc., ou à un autre type de secteur géographique comme la basse vallée de la Durance, la zone de confluence Ariège – Garonne, la baie de Somme... Cette « petite région naturelle » doit présenter des caractéristiques relativement homogènes en matière de climat,

FIG. 15. – Un exemple de petite région naturelle : la Moyenne vallée de l'Oise de la Fère à Noyon, vaste plaine inondable couverte de prairies, formant une unité écologique facilement identifiable. Tout projet d'aménagement écologique de carrière devra être inséré à cette échelle d'approche, intermédiaire entre la région (Picardie en l'occurrence) et le site lui-même.

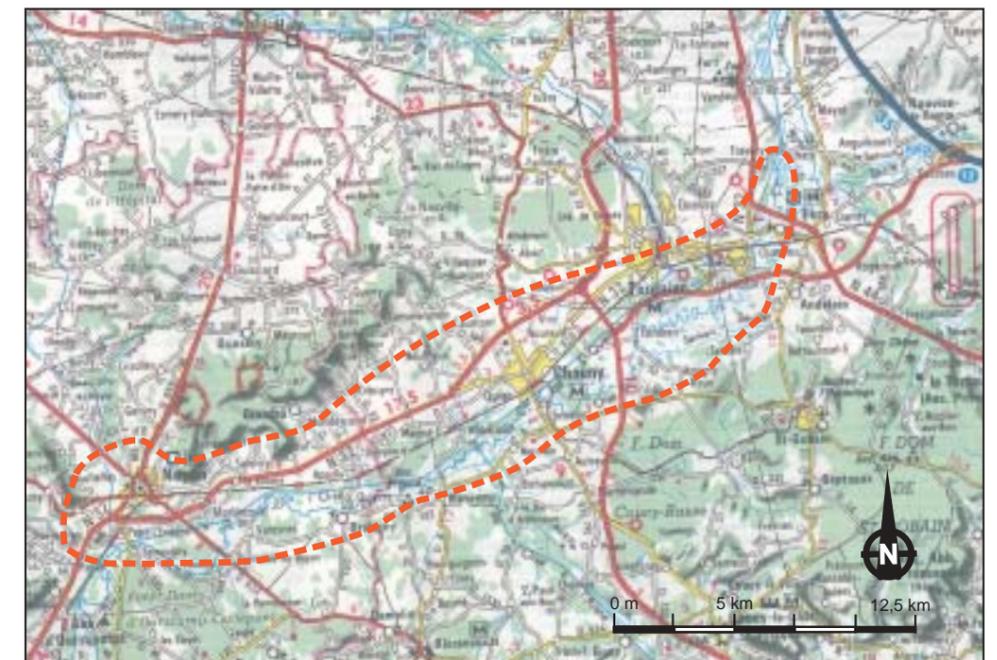
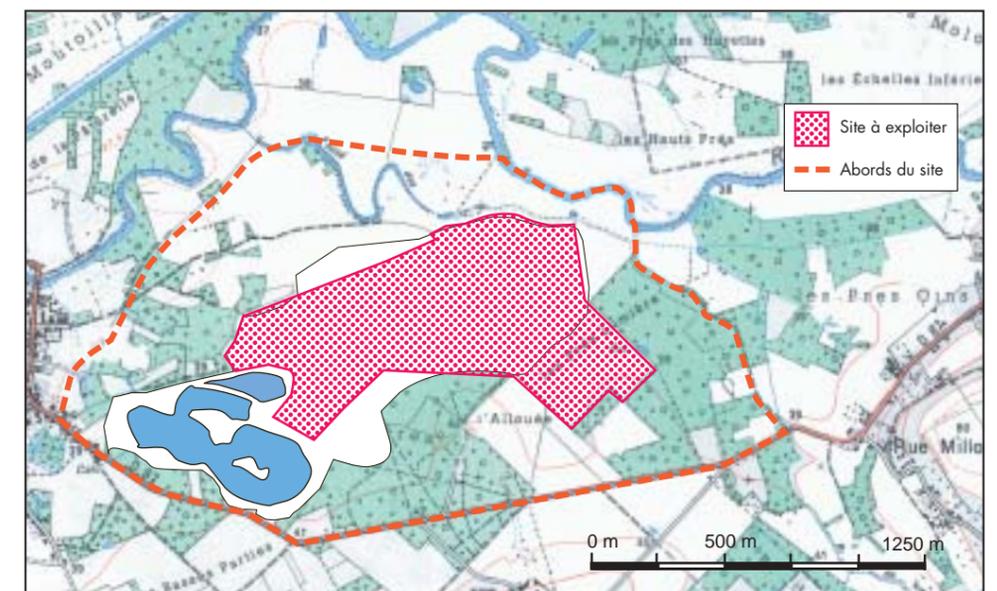


FIG. 16. – L'expertise écologique doit être particulièrement précise au niveau du site et de ses abords. La définition du périmètre des abords du site doit avoir des fondements écologiques. Dans l'exemple illustré, on s'est appuyé sur des limites comme routes, chemins, rivières... en essayant d'intégrer les habitats voisins : gravière déjà exploitée, boisements, annexe fluviale (fossé), espace prairial, bocage humide, berges de l'Oise...



⁽¹⁶⁾ La notion de "sol" est beaucoup plus complexe que celle de "substrat" ; un sol présente plusieurs couches appelées horizons qui s'individualisent au cours de l'évolution du sol (= pédogenèse).

d'affleurement géologique, de sols, d'hydrologie et de phyto-écologie.

3) le site lui-même et ses abords immédiats.

2.2.4. AUTRES DONNÉES ET INFORMATIONS À CONSIDÉRER POUR DÉTERMINER LES OBJECTIFS

Les trois catégories d'information analysées aux chapitres précédents sont indispensables quelle que puisse être l'ampleur et la nature des projets.

Les autres données à prendre en compte pour fixer les objectifs dépendent beaucoup du contexte du projet et des caractéristiques du site. On ne passera donc en revue que celles qui se présentent le plus fréquemment.

L'entretien et la gestion du site après aménagement

A la fin de l'exploitation et après aménagement complet du site, l'exploitant remet les terrains à leur(s) propriétaire(s). Les caractéristiques foncières du site après aménagement doivent pouvoir être connues à l'avance car elles peuvent entrer en ligne de compte comme opportunités ou contraintes vis-à-vis des objectifs. Ceci tient au raisonnement suivant : les objectifs d'un aménagement écologique doivent être définis à court, à moyen et à long terme ; or le(s) propriétaire(s) devenant maître(s) des lieux, la possibilité de prévoir le devenir du site à long terme dépendra de la nature, du nombre et des intentions des propriétaires.

Il n'est pas toujours aisé de maîtriser ce qui pourra advenir d'un site restitué à des propriétaires privés, surtout lorsqu'ils sont nombreux. Le cas d'un seul propriétaire motivé par l'aménagement est beaucoup plus favorable. Toutefois, c'est lorsque la collectivité est propriétaire que les choses sont les plus faciles.

Ce sont les aspects relatifs à la gestion et à l'entretien du site qui sont concernés par ces considérations foncières : capacité d'assurer techniquement et financièrement les entretiens appropriés pour pérenniser les habitats, possibilité de suivi scientifique, site chassé ou non, alignement des plans d'eau, nouvelles plantations pratiquées... D'une façon générale, l'ambition et la nature des objectifs devront être adaptées à la maîtrise foncière du site. Par exemple, dans le cas d'un site dont on ne peut garantir l'entretien à long terme, on s'orientera vers des habitats peu exigeants en termes de gestion.

Cependant, la maîtrise foncière n'est pas un paramètre intangible : sa modification peut être un des objectifs du projet. D'autre part, le projet peut prévoir des conventions de gestion avec des organismes compétents tels que les Conservatoires Régionaux des Espaces Naturels (CREN).

Évaluer la fréquentation future du site

La fréquentation excessive est à l'origine de dérangements et de dégradations (piétinement par exemple) qui peuvent être fatales au succès des aménagements. On peut gérer les circulations à l'intérieur d'un site, mais l'intensité de la fréquentation dont il fera l'objet, échappe en partie aux concepteurs des aménagements. Elle dépend de la densité de population environnante, de l'accessibilité plus ou moins grande, de l'existence à côté du secteur écologique de secteurs de loisirs. S'il paraît difficile de trouver des solutions d'aménagement, il vaudra mieux revoir les objectifs. Par exemple les îles créées dans un plan d'eau, ont beaucoup moins d'intérêt lorsque celui-ci est fréquenté par des embarcations. On peut alors se poser la question d'une meilleure utilisation des remblais (zone humide riveraine plus facile à protéger par exemple).

La question de la chasse

La chasse se pratique en dehors des principales périodes de reproduction des oiseaux. A priori, elle ne concerne donc que l'intérêt du site pour les espèces migratrices et hivernantes. Cependant, on constate souvent que les zones humides chassées sont moins riches en oiseaux nicheurs. D'une part ceux-ci rechignent à se reproduire sur des lieux dérangés en fin d'hiver lorsque certaines espèces commencent à s'installer et en fin d'été lorsque la nidification n'est que partiellement achevée. D'autre part c'est à l'occasion de leurs passages migratoires que les espèces découvrent de nouveaux sites, où elles peuvent s'implanter.

Se renseigner sur les projets d'équipement aux abords

Il est important de connaître les projets envisagés, par exemple en consultant les documents d'urbanisme (SDAU, POS...). Si des terrains bordant le site sont réservés pour une future autoroute ou un canal à grand gabarit, cela peut sérieusement modifier les perspectives.

Les capacités techniques et financières de l'entreprise

Même s'il est vrai qu'un aménagement écologique n'est pas forcément complexe et coûteux, il faut savoir adapter les ambitions (1) aux capacités techniques de l'entreprise (personnels compétents et engins disponibles), (2) à ses possibilités financières en se projetant dans l'avenir (les aménagements n'ont lieu que plusieurs années après leur conception).

Des caractéristiques physiques très particulières

Les particularités physiques du site viendront toujours orienter les objectifs, mais dans certains cas elles doivent également amener à revoir les

ambitions à la baisse. Ce sera le cas par exemple de sites vraiment trop petits (cependant des sites de quelques ha peuvent être très remarquables pour les Amphibiens) ou trop exigus. Citons également le cas d'un volume de matériaux de découverte faible par rapport à l'excavation : les possibilités de

remblayer, de créer des hauts-fonds, de faire des îlots etc., sont alors réduites. De même, les plans d'eau très profonds de la vallée du Rhin posent de vrais problèmes de remise en état : l'aménagement écologique y est possible mais moyennant des coûts élevés (pertes de gisement, travaux lourds).

TABLEAU IV.- Principaux facteurs affectant les ambitions et la nature des objectifs dans un aménagement écologique.

FACTEUR CONSIDÉRÉ	OPPORTUNITÉS	CONTRAINTES	REMARQUES
Foncier	Un seul propriétaire, en particulier si c'est la commune	Nombreux propriétaires => difficulté à mettre tout le monde d'accord	Le cas idéal est celui où l'entreprise est propriétaire
FACTEURS « POLITIQUES »			
Commune(s)	Demande d'aménagement émanant de la (des) commune(s)	Forte(s) exigence(s) communale(s) en matière d'ouverture au public, de vocation ludique...	Les réunions d'information et de concertation, ainsi que les négociations permettent généralement de trouver un modus vivendi
Propriétaire(s)	Propriétaire(s) très motivé(s) par un aménagement écologique	Propriétaire opposé, réticent, ayant des exigences peu compatibles avec les fonctions écologiques...	
Opinion locale	Demande d'aménagement écologique émanant de la population	Une partie de l'opinion est très réticente	
Administrations	Soutien actif des administrations en particulier de la DIREN et de la DRIRE	Réticences de certains services pour des raisons liées à des documents d'urbanisme, à l'existence de projets concurrentiels...	
FACTEURS LIÉS À L'ENVIRONNEMENT HUMAIN			
Densité de population	Zones rurales	Zones peuplées : la probabilité d'une surfréquentation du site est plus grande	À condition que le site ne soit pas trop petit ou exigü, il existe des techniques permettant de combiner fréquentation et intérêt écologique
Accessibilité	Site à l'écart des axes de communication	Accès facile, site visible, attractif	
Chasse	Faible pression de chasse	Forte pression de chasse	
Présence de grandes Infrastructures linéaires	Superficie importante réservée à la vocation écologique	Les lignes HT, les autoroutes, les grandes voies ferrées constituent un danger pour certains groupes d'espèces : collision des oiseaux avec les câbles électriques, risques d'écrasement pour les animaux terrestres, obstacles infranchissables...	
FACTEURS LIÉS AUX CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU SITE			
Taille et forme du site	Site de grande taille, de forme compacte	Sites très petits et/ou très contournés : les ambitions doivent être modérées et adaptées	
Terres de découverte	Présence de substrats originaux (sables calcaires, sables siliceux, sols marécageux...)	Volumes de remblai faibles terres polluées	
Épaisseur du gisement	Profondeur modérée offrant des possibilités de remblaiement significatives	Sur des plans d'eau très profonds, il est difficile et coûteux de réaliser des berges en pente douce	
Dynamique hydrologique qualité des eaux	Possibilité de connections avec la dynamique hydrologique naturelle (inondations, relations directes avec les cours d'eau et fossés, nappe circulante)	Site devant être isolé (le cas fréquent où la gravière doit être "protégée" des crues est défavorable). eaux d'alimentation du plan d'eau risquant d'être polluées : cours d'eau pollué, nitrates et pesticides provenant des cultures...	
FACTEURS TECHNIQUES ET FINANCIERS			
Coûts		Contraintes techniques entraînant de forts coûts pour des résultats médiocres	
Capacités techniques		Petite entreprise ne disposant pas d'engins de chantier adaptés et de personnels formés	
FACTEURS LIÉS À « L'APRÈS-CARRIÈRE »			
Autres vocations du site		Vocations entraînant une forte fréquentation (base de loisirs, camping, cabanons, ...) Vocations entraînant une artificialisation des habitats (agriculture, popiculture...)	Le partage avec d'autres vocations est d'autant plus préjudiciable que le site est petit
Gestion et entretien	Site confié à un organisme compétent dans la gestion des espaces naturels	Aucune garantie sur un entretien approprié du site Propriétaire n'ayant pas les moyens matériels et/ou financiers d'assurer l'entretien	
Suivi du site	Possibilité de faire un suivi scientifique régulier du site Possibilité de réintervenir pour améliorer certains aspects des aménagements		

2.3. DÉFINIR LES OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES

Les expériences d'aménagement ou de restauration écologique menées au cours des trois dernières décennies dans les pays industrialisés ont conduit à une constatation nette : l'une des principales clefs de la réussite réside dans la définition claire des objectifs. Cet enseignement concerne largement l'aménagement écologique des carrières. On ne doit plus se contenter de vagues considérations sur une remise en état à vocation naturelle, mais présenter un argumentaire motivé sur les choix d'aménagement.

Cette approche étant relativement récente, une méthodologie inédite destinée à fixer des objectifs écologiques précis est proposée en annexe. Elle repose sur une approche écologique du monde vivant à trois niveaux. Les objectifs écologiques peuvent être fixés par :

- 1) **une approche par les espèces**
- 2) **une approche par les habitats**
- 3) **une approche par le fonctionnement de l'écosystème**

En effet, l'objectif fondamental des aménagements écologiques de carrières en eau est de réaliser un site ayant un intérêt écologique et pouvant soutenir les espèces palustres et aquatiques mises en difficulté par la forte régression des zones humides naturelles. On peut donc se donner comme objectif de faire venir sur le site telle(s) *espèce(s)* particulière(s).

Mais l'écologie nous apprend que les espèces sont liées à des *habitats* préférentiels : on pourra donc aussi se fixer la création des habitats des zones humides. Cependant les habitats ne sortent pas du néant : ils correspondent à des conditions physiques particulières et ont une structure qui dépend de l'évolution dynamique de la végétation et du mode de gestion qu'on leur applique. Les objectifs peuvent dès lors résider dans la mise en place d'un *fonctionnement* physique, qui favorisera les habitats que l'on cherche à créer.

Les trois types d'approche peuvent être utilisés séparément, mais sont souvent complémentaires. ■

3

3.1	LES REMBLAIS	46
3.2	L'ORGANISATION DES ESPACES AQUATIQUES	49
3.3	LA DÉFINITION ET LA LOCALISATION DES HABITATS	52
3.4	L'INTÉGRATION DU SITE À SON ENVIRONNEMENT NATUREL	58
3.5	L'INTÉGRATION HYDRAULIQUE DU SITE	60
3.6	LA GESTION DES ACCÈS ET DE LA FRÉQUENTATION	65

La conception du plan d'aménagement

À ce stade du projet, on doit disposer des informations et documents nécessaires à la conception d'un plan d'aménagement détaillé. Ces informations indispensables correspondent aux trois phases du processus de réflexion, de concertation et de collecte des données qui ont été décrites au chapitre précédent.

La conception proprement opérationnelle du plan d'aménagement peut alors prendre place. Il va s'agir essentiellement **d'organiser l'espace et de concevoir les travaux**. L'aménagement écologique est une remise en état qui demande de la vigilance. La réussite ou l'échec, l'expérience l'a déjà amplement démontré, tient très souvent à des erreurs d'appréciation commises lors de la réalisation des plans d'aménagement. L'une des clefs du succès consiste dans une attitude pragmatique. On peut conseiller aux bureaux d'études chargés de concevoir concrètement le plan d'aménagement, ainsi qu'aux divers acteurs chargés d'en juger, de toujours conserver à l'esprit que **les plans et documents fournis devront être utilisables sur le site par les personnes chargées des travaux**.

3.1. Les remblais

Le volume et la nature des remblais disponibles sont des données à analyser avec attention dans le cas d'un aménagement écologique. Elles déterminent le ratio terre/eau du futur site et la possibilité de créer certains milieux sur substrats particuliers.



Photo 17. Coupe dans un gisement alluvial classique : au sommet la terre végétale, en dessous des alluvions très argileuses sans valeur économique ; ces deux couches forment la découverte et permettront de remblayer une partie du site lors de la remise en état. Le gisement exploitable apparaît en blanc, baigné par la nappe (Écosphère – Ph. Dasnias).

3.1.1. LE RATIO ZONES ÉMERGÉES / ZONES IMMERGÉES

Les zones humides seront prioritaires dans la grande majorité des aménagements écologiques de gravières en eau. Or, il est primordial de caler correctement le niveau de ces zones humides par rapport à la nappe.

Les données indispensables

Avant de procéder aux calculs, il convient de disposer, avec le plus de précision possible, de certaines données. Ces données indispensables sont énumérées ci-dessous. Il y a d'abord les données liées à la campagne de sondages. Il s'agit :

- 1) de la puissance moyenne du gisement exploitable ;
- 2) de la puissance moyenne des stériles, en distinguant si possible l'épaisseur de terre végétale
- 3) de la profondeur moyenne de l'excavation (somme de 1 + 2)

Vient ensuite une donnée que doivent autant que possible estimer la campagne de sondages et/ou l'expertise hydrogéologique : il s'agit de la profondeur moyenne de la nappe, valeur qui permet d'estimer à quel niveau moyen s'établira le plan d'eau.

Estimation de la proportion de terrains remblayables

Classiquement, on estime la proportion de superficie remblayable en utilisant le rapport entre l'épaisseur des stériles et la profondeur de l'excavation.

Par exemple si le gisement exploitable fait 7 m d'épaisseur et la couche stérile 3 m, la pro-

$$R\% = S \div P$$

où

R% = proportion de terrains remblayables
S = épaisseur de la couche stérile
P = profondeur de l'excavation

fondeur de l'excavation est de 10 m, la proportion de terrains remblayables est de 30 %.

Cependant, cette manière de calculer s'applique à un type d'aménagement où l'on privilégie des remblaiements au niveau du terrain naturel. Or, dans le cas des aménagements écologiques, ce sont les terrains remblayés de part et d'autre du niveau piézométrique moyen qui doivent être recherchés en priorité. Ce type de terrassement est moins consommateur de matériaux, si l'on ne considère le problème que sous l'aspect de la hauteur à atteindre. En revanche, l'aménagement écologique consomme plus de remblais en matière de sinuosité et de complexité des contours qu'un aménagement de type « classique ».

Pour estimer la proportion de terrains remblayables, on utilisera alors la formule :

$$R\% = S \div (P - h)$$

où :

R% = proportion de terrains remblayables
S = épaisseur de la couche stérile
P = profondeur de l'excavation
h = profondeur moyenne de la nappe par rapport au terrain naturel

Si l'on reprend l'exemple précédent et que l'on suppose une nappe située à environ 2 m de profondeur, la proportion de terrains remblayables passe alors de 30 % à 37,5 %.

3.1.2. CHOIX D'UTILISATION DES REMBLAIS DISPONIBLES

Adapter les objectifs en fonction des volumes de remblais disponibles

Les remblais constituent un matériau précieux dans les aménagements. Ils ne doivent donc pas être gaspillés : leur utilisation doit être optimisée en les réservant aux aménagements les plus rentables en termes de bénéfices écologiques. Autrement dit, par rapport aux objectifs, il va falloir choisir et parfois abandonner ou corriger à la baisse certains objectifs trop consommateurs de remblais : par exemple, on pourra être amené à abandonner le projet de faire une île, ou la réaliser plus près de la berge que ce qui serait souhaitable dans l'idéal.

D'une façon générale, puisque le but des aménagements écologiques de carrières en eau sera de faire une zone humide, on réservera en priorité les matériaux de remblais aux zones immergées peu profondes (hauts fonds) et à celles situées dans la frange de battement de la nappe (berges inondables).

Économiser les remblais

Un certain nombre de techniques permettent d'économiser les remblais :

- 1) placer les zones émergées là où l'excavation est la moins profonde (cas où l'on dispose d'une campagne de sondages dense).

FIG. 17. – Coupe schématique de la proportion de terrains remblayables (R %) en fonction de la puissance du gisement (P), de l'épaisseur des stériles (S) et de la profondeur moyenne de la nappe (h).

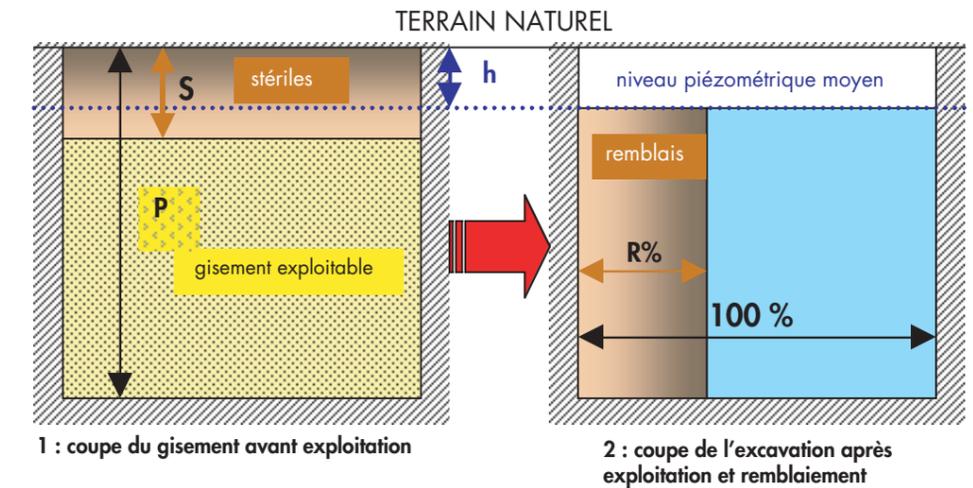
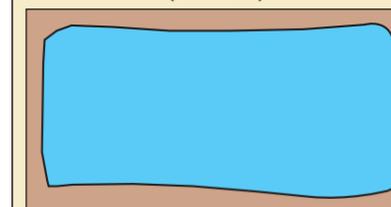
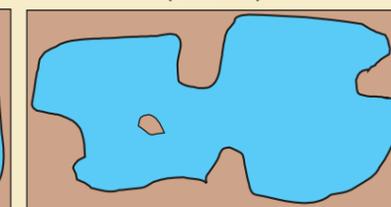


FIG. 18.

CAS PEU FAVORABLE (R% = 10 %)



CAS INTERMÉDIAIRE (R% = 30 %)



CAS TRÈS FAVORABLE POUR L'AMÉNAGEMENT (R% = 50 %)

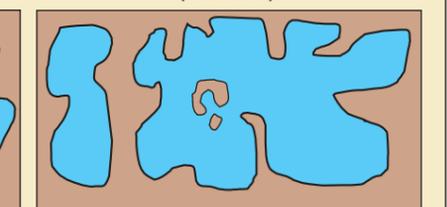
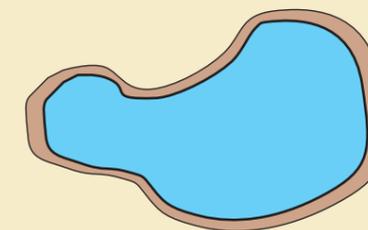
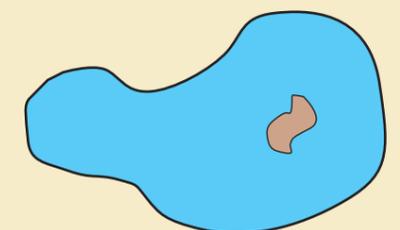


FIG. 19. – La quantité de remblais est un atout pour l'aménagement écologique : elle permet de réaliser des contours sinueux, des hauts-fonds, des îles, des presque-îles...

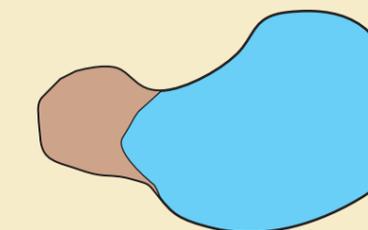
FIG. 19. FAIRE DES CHOIX DANS L'UTILISATION DES REMBLAIS



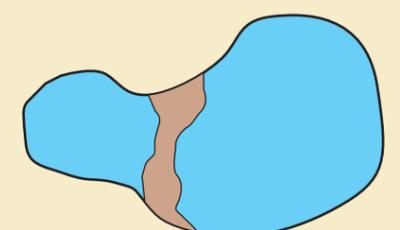
Exemple n° 1 : Répartition des remblais sur l'ensemble des berges



Exemple n° 2 : Réalisation d'une île



Exemple n° 3 : Réalisation d'une grande zone humide en queue d'étag



Exemple n° 4 : Création de deux plans d'eau

FIG. 19. – Afin d'optimiser leur efficacité écologique, il est souvent nécessaire de faire des choix dans l'utilisation des remblais disponibles. Voici par exemple, quatre options possibles d'aménagement pour un même volume de remblais.

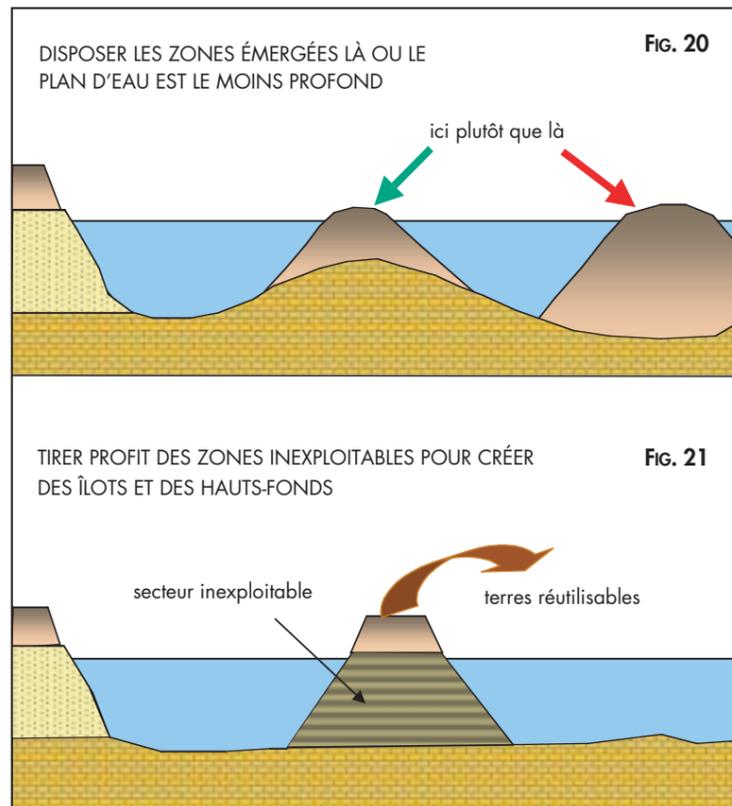


FIG. 20. – Une économie substantielle de matériaux de remblai pourra être faite si on localise les remblais dans les zones les moins profondes du plan d'eau.

FIG. 21. – Les zones inexploitablees (absence de gisement, servitude, contraintes diverses...) peuvent être utilisées pour créer des îlots ou des hauts-fonds sans consommer de matériaux de remblai. De surcroît, les terres décapées pourront être utilisées ailleurs dans la remise en état.

- 2) décaper les zones inexploitées pour en faire des zones de hauts-fonds et réutiliser les terres décapées.
- 3) utiliser les fines de lavage lorsqu'il y a une installation de traitement sur place ; le bassin de décantation, si son niveau est judicieusement calé, permet de créer des hauts-fonds à peu de frais.

- 4) réaliser les travaux d'aménagement hors d'eau, ce qui permet une plus grande précision : localisation des pentes plus fortes sous l'eau avec possibilité de tasser les matériaux.

En cas de déficit important de matériaux de remblayage, on peut en importer sur le site. Cependant, il faudra être très vigilant quant à leur nature et leur provenance qui se révèlent parfois douteuses et difficiles à contrôler.

3.1.3. CHOIX ET LOCALISATION DES SUBSTRATS

On ne peut suffisamment insister sur la nature fondamentale des caractéristiques du sol, aussi bien celui qui est décapé, que celui qui va être remis en place. Dès la conception du plan d'aménagement, on doit prévoir les décapages sélectifs et la nature des substrats reconstitués.

Les substrats particuliers

Un substrat particulier se distingue par l'une ou l'autre de ses caractéristiques des sols moyens classiquement présents dans nos plaines. Les végétaux sont très dépendants du type de sol sur lesquels ils se développent. De ce fait, lorsque l'on recherche des espèces peu communes, on a plus de chances de les obtenir quand le sol est peu commun. En simplifiant, on pourrait écrire :

substrat particulier ↔ végétaux particuliers

Si les substrats particuliers ont été repérés par la visite des écologues sur le site ou par les campagnes de sondage, on doit spécifier leur décapage et leur stockage sélectifs qui seront pris en compte dans le plan de phasage des travaux. Au moment de la conception du plan d'aménagement, on doit prévoir à quels habitats ces terres spéciales seront réservées. Il arrivera souvent d'ailleurs que l'idée de créer certains habitats vienne de l'opportunité de disposer de substrats particuliers sur le site.

Les substrats particuliers par leur granulométrie

La granulométrie moyenne des principaux sols est du type argilo-limoneux à argilo-sablo-limoneux. Ceci tient à la décomposition normale des roches sous nos climats. En conséquence, tout ce qui s'écarte de cette moyenne générale a tendance à être un substrat particulier par sa granulométrie.

Parmi ces substrats qui se distinguent par leur granulométrie, signalons ceux que l'on rencontre plus spécifiquement dans les gravières :

- les sables très pauvres en argiles et limons (sables et graviers siliceux ou silico-calcaires) ;
- les substrats très argileux qui sont très imperméables et peuvent servir à isoler des dépressions humides ;
- les fines de décantation ou fines de lavage sont des matériaux très argileux et souvent homogènes, qui peuvent être utilisées pour réaliser des hauts-fonds ;
- les blocs qu'on trouve dans les alluvions peuvent être utilisés pour conforter des berges, pour enrocher des îlots et les protéger de l'érosion...

Les substrats particuliers par leur pH

Le pH moyen des sols de nos régions est normalement légèrement acide (6 à 6,5), bien que les amendements agricoles le ramènent souvent vers la neutralité. En conséquence les sols acides et très acides, ainsi que les sols basiques sont des substrats originaux. Pour les premiers, il s'agit essentiellement de sables siliceux ou d'argiles décalcifiées, pour les seconds de substrats riches en calcium : sables fossilifères, roches calcaires...

Les substrats particuliers par leur faible fertilité

Les efforts constants de l'agriculture pour augmenter la productivité des sols ont conduit à rendre originaux et rares, les sols peu fertiles. Ces substrats, dits oligotrophes, sont le plus souvent, dans le cas des carrières, des sables silico-calcaires ou plus encore siliceux. Ils supportent des pelouses rases ou des landes.

Les substrats particuliers liés aux sols engorgés en permanence

Les sols engorgés en permanence par la nappe sont de moins en moins fréquents du fait de « l'assainissement » des terres et des drainages. On ne discutera pas ici les propriétés de ces sols, mais il faut savoir que compte tenu d'une très mauvaise oxygénation, la matière végétale s'y dégrade très lentement. On distingue :

- des sols où la nappe ne circule pratiquement pas et n'oscille verticalement que très peu ; il se forme alors de la tourbe, reconnaissable à sa couleur gris foncé à noire : les substrats tourbeux, qu'ils soient acides ou basiques portent des types de végétations originales ;
- des sols, dits à *gley*, où la nappe oscille entre un niveau de hautes eaux et un niveau de basses eaux et où un drainage latéral est possible : la matière végétale forme alors une épaisse couche qui se décompose lentement au gré des mouvements de la nappe ; ces sols souvent appelés « paratourbeux » sont le support idéal des formations végétales marécageuses des plaines alluviales.

Photo 18. Un sol tourbeux basique dans un secteur de longue stagnation des eaux d'inondation (Moyenne vallée de l'Oise) (Écosphère – M. Pajard).



3.2. L'organisation des espaces aquatiques

La répartition des espaces en eau est importante pour bien des propriétés du futur site. On notera en premier lieu qu'elle est déterminée en grande partie par des facteurs sur lesquels le concepteur de l'aménagement a peu ou pas de prise : superficie du site, localisation des secteurs en eau, volumes de découverte... Mais il reste des choix à faire, en particulier au niveau du nombre et du contour des plans d'eau.

3.2.1. NOMBRE ET SUPERFICIES DES PLANS D'EAU

La question du nombre de plans d'eau à créer est étroitement dépendante de la superficie du site, puisque la question est d'autant plus pertinente que le site est grand.

Les petites exploitations (moins de 10 ha et même moins de 1 ha) ont été monnaie courante jusque dans les années 80. Des paysages mités d'innombrables plans d'eau sont ainsi apparus dans diverses portions de vallées alluviales. Outre leurs inconvénients esthétiques, ces espaces ont montré de médiocres qualités écologiques et une forte tendance à se colmater. La réaction logique a donc été de favoriser la réalisation de grands plans d'eau. Si ceux-ci ont incontestablement moins tendance à se colmater et permettent une meilleure organisation de l'espace, d'un point de vue écologique les résultats sont plus mitigés. L'avantage par rapport aux petits plans d'eau n'est net que pour les oiseaux et plus particulièrement en période internuptiale. Faut-il donc absolument privilégier les plans d'eau de grande taille ? En fait ceci dépend en grande partie des objectifs.

Objectif ornithologique

Lorsque l'objectif est ornithologique, les observations militent en faveur des grands plans d'eau :

- les petits plans d'eau sont colonisés plus difficilement que les grands ;
- ils n'accueillent que de petites populations, dont la présence est menacée par leur petite taille ;
- ils ne peuvent accueillir les espèces exigeant de grands territoires ;
- leurs ceintures de végétation sont souvent plus homogènes et ne procurent qu'un nombre limité d'habitats ;
- les petits plans d'eau ne permettent pas de mettre en place des îles distantes des rivages ;
- les petits plans d'eau sont par nature plus facilement soumis au dérangement depuis leurs berges que les grands plans d'eau.

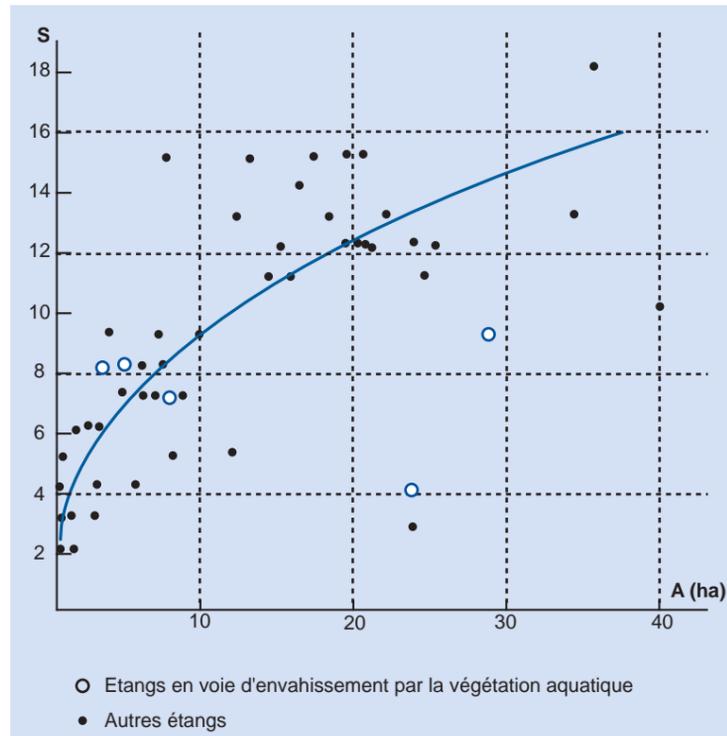


FIG. 22. – évolution de la richesse spécifique en oiseaux nicheurs (S) avec la superficie des étangs (A) dans la plaine de Saône. [d'après ROCHÉ J., 1982 – Structure de l'avifaune des étangs de la plaine de Saône : influence de la superficie et de la diversité végétale. *Alauda*, 50(3) : 193-215.]

Selon les quelques études dont on dispose à ce sujet, il existe une relation positive entre la taille d'un plan d'eau et sa richesse spécifique en oiseaux aquatiques nicheurs, mais cette relation n'est pas linéaire.

Le type de courbe présente une partie rapidement ascendante, une partie « d'inflexion », puis une partie qui croît lentement : ce que l'on peut traduire en 3 catégories de superficie :

- au-dessous de 5 ha en eau, la richesse spécifique décroît rapidement et seules les espèces les moins exigeantes (Canard colvert, Poule d'eau, Foulque macroule, Grèbes huppé et castagneux) se maintiennent ;
- entre 5 et 50 ha, on trouve des richesses diverses, mais c'est là que se situent les seuils minimaux pour les espèces exigeantes comme les Anatidés ; pour les Laridés, le seuil minimal serait plus proche de 20 ha (espèces nichant à découvert et donc sensibles au dérangement) ;
- au-delà de 50 ha, la richesse spécifique est généralement bonne et une ou plusieurs espèces exigeantes nichent ; mais à partir de là l'accroissement de taille n'a plus d'effets significatifs sur la diversité avifaunistique et s'efface devant des critères plus déterminants : nature de la végétation riveraine, tranquillité du site, productivité du plan d'eau...

Le seuil de 5 à 50 ha ne s'applique qu'à des plans d'eau d'un seul tenant de forme assez ramassée (il ne s'applique par exemple pas à un plan d'eau de 15 ha constitué de 5 plans d'eau de

3 ha communiquant entre eux). Ceci signifie que c'est surtout la sensation de sécurité qui joue : possibilité de s'éloigner des berges.

A ces résultats on ajoutera un élément bien connu des ornithologues : les oiseaux, en particulier les migrateurs et hivernants, préfèrent les sites où existent plusieurs plans d'eau, car ils peuvent se déplacer d'un plan d'eau à l'autre en cas de dérangement.

En conclusion, en ce qui concerne les objectifs ornithologiques, on se contentera d'un seul plan d'eau, tant que celui-ci ne pourra dépasser 50 ha. Au-delà, on conservera toujours un grand plan d'eau, mais la priorité ne sera plus à la constitution d'un deuxième grand plan d'eau. Il vaudra mieux au contraire diversifier les superficies et créer des plans d'eau petits et moyens et surtout autant de zones humides que possible. En effet, la superficie d'un plan d'eau n'est rien s'il est dépourvu de zones humides.

Autres objectifs

Une superficie en eau suffisamment grande est aussi probablement favorable pour un objectif ichtyologique (soutien à une espèce de poisson en difficulté), en particulier parce que les masses d'eau importantes ont un pouvoir tampon vis-à-vis des variations de différents paramètres : température, pH, concentration en produits toxiques... En revanche, on sait que les Amphibiens ou les Odonates affectionnent les petits plans d'eau où ils ne sont pas en concurrence avec les poissons.

La flore vasculaire réagit peu à la taille des plans d'eau mais nettement à la diversité et à la superficie des biotopes émergés et amphibies.

3.2.2 LA FORME GÉNÉRALE DES PLANS D'EAU

Le fait qu'un plan d'eau soit plutôt ramassé ou plutôt allongé a des effets en différents domaines.

La distance du centre du plan d'eau aux berges

D'abord, à superficie égale, plus un plan d'eau est allongé, moins son centre est éloigné des berges. Ceci est un inconvénient pour la sensation de sécurité ressentie par les oiseaux et en particulier pour ceux qui nichent sur des îlots à découvert (Sternes et Mouettes).

L'allongement des plans d'eau et les effets du vent

Plus un plan d'eau est allongé dans le sens des vents dominants, plus la houle qui se forme sur la berge exposée est ample. Les phénomènes de batillage ont des effets négatifs que l'on voudra souvent éviter, mais aussi des effets positifs que l'on peut rechercher pour certaines berges.

Afin d'éviter les phénomènes excessifs d'érosion dus au batillage, il faut éviter que la lon-

TABLEAU V. – Influences de la profondeur et de l'allongement du plan d'eau sur la hauteur et la longueur des vagues pour un vent de 60 km/heures. (adapté d'après ANDREWS J. & KINSMAN D. – Gravel pit restoration for wildlife. A practical manual. 1990 – Tarmac Quarry Products, RSPB)

Profondeur	1,5 m	1,5 m	7,5 m	7,5 m
Longueur dans le sens du vent	150 m	600 m	150 m	600 m
Hauteur des vagues	0,20 m	0,33 m	0,20 m	0,39 m
Longueur des vagues	2,8 m	4,7 m	2,8 m	5,5 m

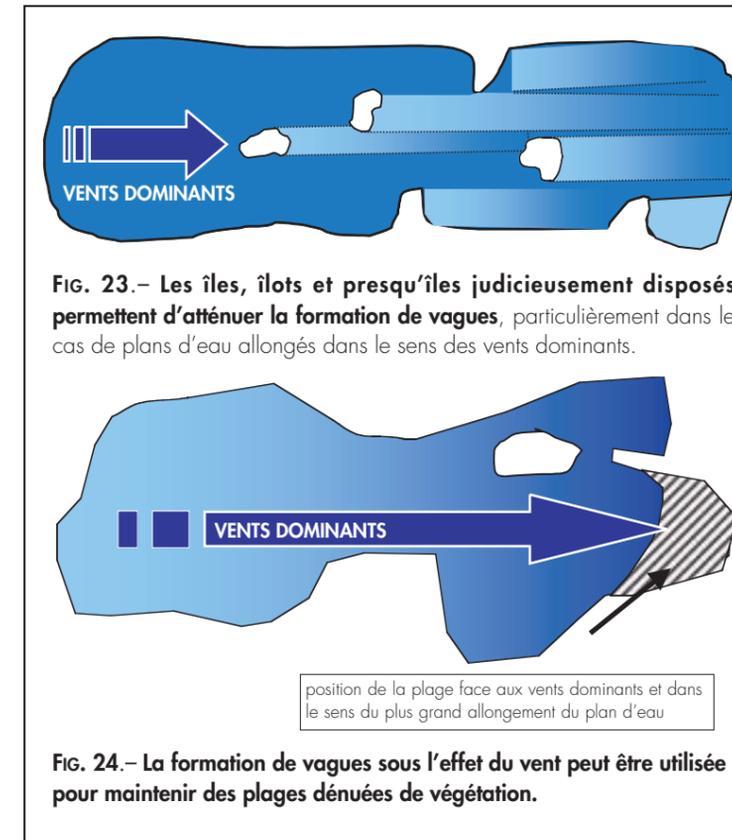


FIG. 23. – Les îles, îlots et presqu'îles judicieusement disposés permettent d'atténuer la formation de vagues, particulièrement dans le cas de plans d'eau allongés dans le sens des vents dominants.

FIG. 24. – La formation de vagues sous l'effet du vent peut être utilisée pour maintenir des plages dénuées de végétation.

TABLEAU VI. – Effets écologiques des vagues dans les plans d'eau. (d'après MERRITT A. – *Wetlands, industry & wildlife*. 1994, The Wildfowl & Wetlands Trust)

EFFETS NÉGATIFS	EFFETS POSITIFS
Augmentation de la turbidité par mise en suspension de sédiments => réduction de la photosynthèse	Oxygénation des eaux
Érosion des berges et des îlots	Maintien de bancs graveleux utilisés par quelques oiseaux nicheurs et des invertébrés spécialisés
Perturbation des sédiments fins et de leur benthos associé	Maintien de berges nues appréciées par les oiseaux au repos
Dégâts aux herbiers aquatiques	Opposition au recouvrement total par les plantes flottantes
Dégâts aux plantes émergées (y compris ceux dus aux objets flottants)	Création d'objets flottants utiles aux invertébrés ou à l'alimentation des oiseaux
Interruption d'activités aviennes comme le gagnage ou le repos	Retardement du gel de la surface

gueur dans l'axe du vent ne dépasse deux fois la largeur. Si c'est impossible, on aura alors tout intérêt à interposer des îles ou presqu'îles.

La présence de grandes plages sableuses, graveleuses, argilo-limoneuses peut être souhaitée en particulier comme zone de repos pour les oiseaux. On aura alors intérêt à les disposer face à la houle maximale.

L'allongement des plans d'eau et les effets hydrauliques

Le dernier effet de l'allongement du plan d'eau est d'ordre hydrogéologique. Rappelons que la création d'une gravière pénétrant dans la nappe alluviale remplace une surface piézométrique présentant une inclinaison (d'amont en aval) par une surface plane : la nappe est rabattue à l'amont, elle est mise en charge à l'aval. Les phénomènes, peu perceptibles sur une petite gravière, peuvent devenir significatifs si la gravière est grande et plus encore si elle est allongée dans le sens du gradient piézométrique. Le phénomène peut être utilisé pour mettre en eau une zone humide créée à l'aval.

3.2.3. LA SINUOSITÉ DES CONTOURS

La réalisation de plans d'eau aux contours le plus sinueux possible est très souvent réclamée par les écologues. Il s'agit bien sûr en association avec des pentes douces, de développer le plus possible les zones humides des rives. Par ailleurs, l'alternance de caps et de baies brise en partie l'énergie des vagues et diminue l'intensité de l'érosion des berges. L'expérience a montré qu'une alternance avec un rythme de l'ordre de 10 m était optimale pour absorber au mieux l'énergie de la houle.

Un autre argument est que la multiplication des anses accroît les possibilités d'installation des

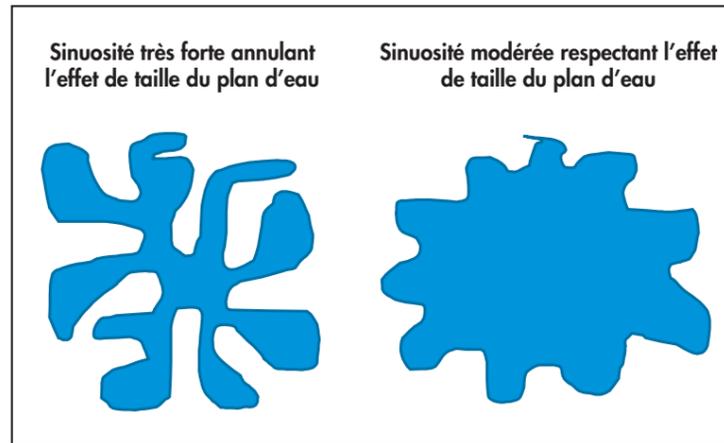


FIG. 25. – La recherche excessive de la sinuosité risque de nuire aux effets positifs de la taille du plan d'eau.

animaux territoriaux qui peuvent accepter de plus petits territoires si ceux-ci sont isolés. Pour conserver l'effet de taille d'un plan d'eau, la sinuosité doit cependant rester modérée vis-à-vis du contour général. Si les presqu'îles sont trop importantes, elles auront le même effet qu'une division du plan d'eau en plusieurs plus petits.

3.2.4. LES ÎLES ET ÎLOTS

Les îles et îlots sont fréquents dans les aménagements écologiques. Un chapitre spécial leur est consacré. A ce stade de l'organisation des espaces aquatiques, rappelons quelques éléments relatifs à leur positionnement.

- 1) les îles ont nettement moins d'intérêt dans les petits plans d'eau car on ne peut les éloigner franchement de la berge.
- 2) les îles étant très consommatrices de matériaux, on profitera autant que possible des zones inexploitable⁽¹⁾ pour les créer ; si cette opportunité ne se présente pas, on les localisera dans les zones où le fond de fouille est le moins profond (d'où l'intérêt de disposer d'un maillage dense de sondages).
- 3) l'un des intérêts majeurs des îles étant qu'elles fournissent pour les oiseaux un espace protégé du dérangement humain et des prédateurs terrestres (renard, mustélidés, gros rongeurs), on les positionnera aussi loin que possible de la berge (pour les Limicoles ce paramètre est cependant moins important que la proximité de vasières ou de prairies humides).
- 4) la disposition des îlots et petites îles en archipel est attrayante pour les oiseaux et permet une protection réciproque contre le battillage et l'érosion des berges ; positionner des hauts-fonds et/ou des vasières au centre de l'archipel, permet d'assurer à de nombreux oiseaux aquatiques « le gîte et le couvert ».

(1) Zones sans gisement exploitable, zones présentant des contraintes et/ou servitudes particulières...

- 5) la taille optimale des îles varie selon les objectifs recherchés (voir le chapitre spécial consacré à l'aménagement des îles).
6. les îles permettent de briser la houle dans les plans d'eau allongés (voir supra) ; s'il y en a plusieurs, on veillera à ce qu'elles forment des écrans complémentaires vis-à-vis des vents dominants.

3.3. La définition et la localisation des habitats

Que les objectifs soient exprimés en termes d'espèces, de milieux ou de fonctionnement des écosystèmes, il faut passer en revue tous les habitats à mettre en place ou à favoriser. On n'oubliera pas à ce stade les habitats complémentaires des habitats principaux, ni les habitats linéaires (fossés, haies, ourlets...) qui sont d'une grande importance dans la cohérence des écosystèmes.

3.3.1. ANALYSER LES OBJECTIFS EN TERMES D'HABITATS

Pour chacun des objectifs retenus pour le site, la liste des habitats souhaitables et possibles (compte tenu des caractéristiques du site, des capacités techniques...) est dressée. Ils sont ensuite hiérarchisés selon leur caractère plus ou moins central vis-à-vis des objectifs. Il ne s'agit pas de parvenir à un classement rigoureux, mais de distinguer les habitats indispensables des habitats moins indispensables, comme habitats supplémentaires, comme habitats complémentaires, comme habitats linéaires assurant des connexions...

Le site n'étant pas extensible, on indiquera en face de chaque habitat la superficie ou le linéaire souhaitable, compte tenu des objectifs. Un travail un peu plus sophistiqué consiste comme dans le tableau VII à mettre en regard la superficie optimale et la superficie minimale (= en dessous de laquelle l'habitat perd son intérêt au regard des objectifs).

Cette étape est essentielle pour la cohérence du projet. C'est en effet à ce stade qu'il faut éviter la création d'un trop grand nombre d'habitats sous prétexte de diversité. On ne doit pas hésiter à faire des choix et à éliminer certains habitats pour lesquels on ne peut réserver une superficie suffisante.

Inversement, pour les habitats « prioritaires » de l'aménagement, il ne faut pas hésiter à être large dans la superficie souhaitable, du moment qu'il s'agit d'une des caractéristiques dont dépend leur intérêt. Par exemple, le Butor blon-

gios (*Ixobrychus minutus*) aura peu de chances dans une roselière de moins de 2 ha ou le Courlis cendré (*Numenius arquata*) dans un ensemble prairial de moins de 20 ha.

3.3.2. DÉFINIR LES EXIGENCES DES HABITATS

Muni de la liste des habitats à créer, on dresse le catalogue de leurs exigences. Les « habitats cibles » sont définis en termes de profondeurs requises, de configuration du sol, des berges, du plancher, de types de substrat (graviers, sables, sol riche, boues...), d'éléments topographiques particuliers (îles, dépressions, microfalaises...). Ce sont les travaux de terrassement qui sont envisagés dès ce stade : niveau requis par rapport à la nappe, topographie particulière, nature et disposition des matériaux, etc.

Pour certains habitats la nature du ou des végétaux dominants est un paramètre essentiel à leur définition.

TABLEAU VII. – Exemple fictif d'une liste des habitats à créer et de leurs superficies ou linéaires.

Habitats	Superficie ou linéaire optimaux	Superficie ou linéaire minimaux
Chênaie-frênaie alluviale	25 ha	15 ha
Aulnaie-frênaie	25 ha	15 ha
Haies épineuses	3 000 m.l	1 000 m.l
Mégaphorbiaies ?	?	
Phragmitaies	10 ha	5 ha
Prairies humides	25 ha	10 ha
Pelouses sur sables silico-calcaires	?	0,5 ha
Vasières	5 ha	1 ha
Etc.		



Définition des habitats : principales caractéristiques à rappeler pour la phase des travaux

Caractéristiques hydriques : positionnement par rapport au niveau moyen de la nappe, tolérance autour de ce positionnement moyen.

Caractéristiques de substrat : niveau de fertilité (substrat très pauvre, moyennement pauvre, assez riche, riche...), granulométrie (cailloux,

sables, limons, argiles), substrat acide ou basique (en particulier dans le cas des sables), perméabilité / imperméabilité...

Caractéristiques topographiques : gamme de pentes, sinuosité des berges (indispensable, indifférente, linéarité préférable...), planéité (plat ou chahuté)...

Espèces végétales structurantes : pour les cas où une ou plusieurs espèces (ou groupe d'espèces) entrent dans la définition même de l'habitat (phragmitaie, cariçaies, aulnaie, jonçaie...)

Caractéristiques de localisation interne au site : tel habitat doit absolument être à l'aval hydrogéologique, tel autre exposé Sud à Sud-Ouest, tel autre protégé du battillage, tel habitat insulaire doit impérativement être loin des berges...

Connexions avec les habitats environnants : dans certains cas, les connexions avec des habitats voisins, étendus ou linéaires font partie des caractéristiques à mentionner.

Afin de guider le chef de chantier, il est conseillé de produire un document synthétique, rappelant pour chaque type d'habitat ses caractéristiques. Ce document permettra lors des travaux, d'interpréter le plan d'aménagement selon les réalités du terrain, tout en restant fidèle à l'esprit. La distinction doit être faite, entre des caractéristiques à respecter absolument car elles servent à définir l'habitat, et d'autres étant seulement souhaitables.

3.3.3. CARTOGRAPHIER LES HABITATS

La cartographie des habitats est un des documents essentiels à fournir pour un aménagement écologique. Pour chaque habitat, il faut prendre en compte des paramètres de taille, de forme, de localisation, d'agencement interne et d'accessibilité des milieux.

La superficie des habitats

En général, plus un habitat est grand, plus il accueille d'espèces et d'individus. Cependant, la taille optimale dépend des objectifs recherchés : les roselières inondées n'atteignent leur plein intérêt qu'au-delà de quelques ha, tandis que les îlots dénudés n'ont besoin ni d'être très grands ni d'être très nombreux pour être exploités par leurs espèces caractéristiques. Les mares, quant à elles, tiennent leur intérêt pour les Amphibiens et les Odonates du fait de leur petite taille (et souvent leur assèchement temporaire) qui leur évite d'être colonisées par les poissons. Le site n'étant pas extensible, on fera donc bien attention à dimensionner les différents habitats selon les objectifs recherchés.

La forme des habitats

La forme des habitats peut aussi jouer un rôle dans leur valeur, en réduisant ou en augmentant (pour une même superficie) la zone de contact avec les autres milieux (= *écotone*).

Beaucoup d'habitats gagnent à être compacts et d'un seul tenant, car ils sont ainsi mieux protégés des agressions extérieures. D'autre part, la forme compacte est celle qui assure la plus grande superficie de « noyau » caractéristique du milieu. En effet, au niveau de ces écotones, on observe l'*effet lisière*, à savoir que les caractéristiques de chaque habitat y sont progressivement modifiées. Par exemple, en bordure d'une forêt, la luminosité et les variations de température s'accroissent progressivement et les espèces véritablement forestières sont moins représentées.

Mais dans certains cas, c'est l'écotone lui-même qui est recherché et l'on voudra maximiser son linéaire et donc l'effet de lisière (habitats

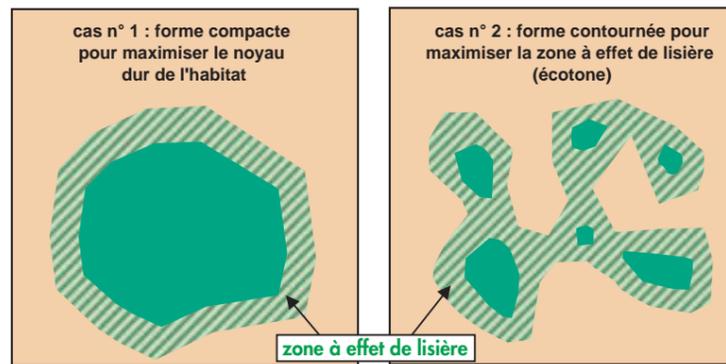


FIG. 26. – La forme des habitats et l'effet "lisière".

humides des berges, lisière chaude d'un bois, etc.), ce qui aura une répercussion sur la forme des différents habitats concernés.

Enfin, certains habitats jouent un rôle de connexion des milieux entre eux et les formes complexes avec diverticules sont les bienvenues. Par exemple, des chenaux peu profonds et ramifiés au sein d'habitats humides non aquatiques assurent la circulation de l'eau et maintiennent un taux élevé d'humidité dans les sols qu'ils bordent. Les réseaux de haies maintiennent des liens entre les boisements et constituent une voie de transit pour de nombreuses espèces.

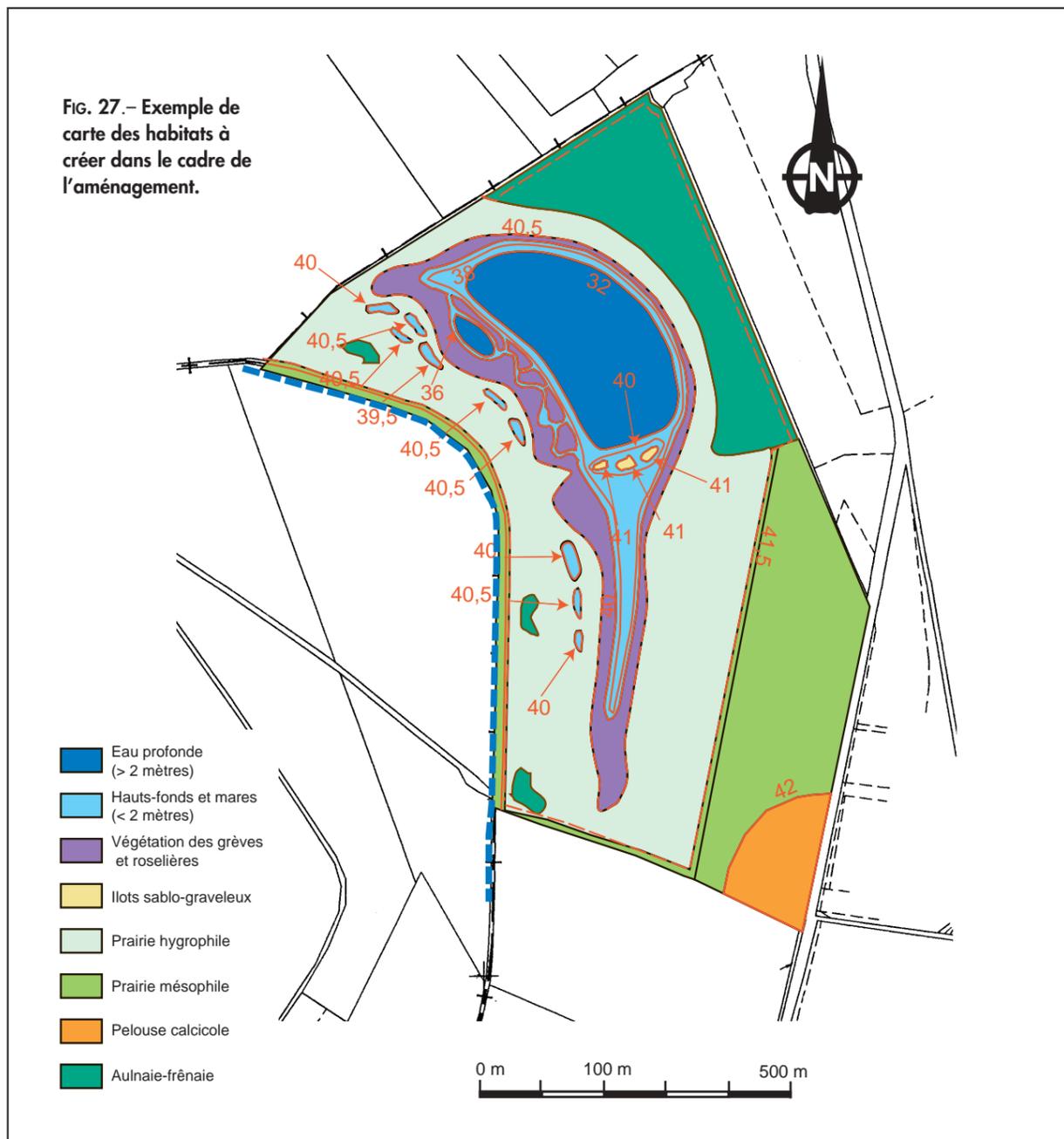


FIG. 27. – Exemple de carte des habitats à créer dans le cadre de l'aménagement.

La localisation des habitats

La localisation idéale des habitats, qu'on ne pourra pas assurer pour chacun d'entre eux, met en jeu leurs exigences ou leurs préférences à divers égards. Selon les habitats, on pourra être amené à prendre en considération tout ou partie des caractéristiques suivantes.

- 1) le positionnement par rapport au niveau de la nappe
- 2) le positionnement à l'amont ou à l'aval hydrique
- 3) l'exposition par rapport au soleil
- 4) l'exposition par rapport aux vents dominants
- 5) la pente des terrains

L'insertion dans la mosaïque des autres milieux du site lui-même ou de ses abords est aussi à prendre en considération (voir infra, le chapitre consacré à l'insertion dans l'environnement) :

- 1) le positionnement à proximité de milieux complémentaires
- 2) la connectivité vis-à-vis d'habitats du même type
- 3) le respect de gradients trophiques (ex : ne pas mettre en communication un milieu oligotrophe et un milieu nitraté)
- 4) la prise en compte du dérangement (éloigner les habitats les plus sensibles des zones habitées) et de la prédation
- 5) la nécessité de disposer de zones dégagées autour des plans d'eau destinés aux oiseaux
- 6) pour les boisements, leur ombre portée sur d'autres milieux.

L'agencement interne des habitats du site

De nombreux habitats sont complémentaires écologiquement et leur juxtaposition renforce l'intérêt de chacun. Citons par exemple : les clairières au sein des boisements, les « clairières » et chenaux aquatiques au sein des roselières ou cariçaias, les mares et fossés au sein des prairies humides, les bosquets épineux au sein des zones herbacées...

L'accessibilité des milieux

L'utilisation de la forme, de la localisation et de l'agencement des habitats en fonction de leur caractère plus ou moins pénétrable, plus ou moins attractif... est une des manières les plus satisfaisantes de contrôler la fréquentation d'un site. Il s'agit d'un thème important qui sera traité un peu plus loin.

3.3.4. DÉCRIRE LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT À RÉALISER

Les travaux à réaliser pour chaque habitat doivent être décrits afin d'orienter le futur chan-

tier. Le type de substrat à constituer est défini sous plusieurs angles.

- ⇒ pente (terrain plat, légèrement en pente pour le drainage, en pente raide avec exposition particulière, talus...)
- ⇒ calage à trouver par rapport au niveau de la nappe afin de respecter les caractéristiques d'humidité recherchées.
- ⇒ substrat monocouche (ex. : une couche de sables) ou multicouche (une couche de graviers reposant sur une couche d'argile) : pour chaque couche : épaisseur et type (parfois origine quand le sol d'un secteur a été conservé séparément)
- ⇒ hétérogénéité : mise en place de dépressions, d'ondulations (destinées à créer des variations de profondeur lors d'inondations), de fossés (drainage ou alimentation en eau), d'embrochements (lutte contre l'érosion), etc.
- ⇒ les recommandations sur l'utilisation / non-utilisation de la terre végétale (ou de la couche humifère sous-jacente) sont particulièrement importantes.
- ⇒ dans certains cas il s'agira carrément de remettre en place un sol décapé sélectivement (ex. sol à gley décapé dans une dépression argileuse, rendzine portant une pelouse calcaire).

3.3.5. PRÉVOIR LES TRAVAUX DE VÉGÉTALISATION

C'est aussi à ce stade qu'il faut envisager la végétalisation des terrains (voir infra, le chapitre spécial consacré à ce thème important). Il s'agit surtout d'indiquer le résultat souhaité. On précisera si on peut laisser l'habitat à une colonisation spontanée ou si une végétalisation initiale est nécessaire pour canaliser l'évolution naturelle, pour éviter l'érosion, pour introduire les végétaux structurant le milieu (roseaux, arbres...). Il faut essayer de prévoir ce qui sera fait et définir les végétaux utilisés, les options d'implantation choisies (techniques classiques ou techniques plus expérimentales par exemple) et les substrats nécessaires.

A ce niveau, il faut cependant éviter de rentrer excessivement dans les détails. C'est au moment de la phase de travaux que seront actualisées et déterminées précisément les techniques à mettre en œuvre (les choses évoluent rapidement dans ce domaine et il se peut qu'il existe au moment des travaux des techniques non disponibles lors de la conception), l'origine des espèces semées ou plantées, la densité, le nombre de plants...

Le type de gestion et d'entretien destiné à maintenir la végétation souhaitée doit déjà être envisagé à ce stade : faisabilité, coûts...

3.3.6. LA CARTE TOPOGRAPHIQUE ET LA CARTE DES SUBSTRATS

Les informations liées à l'emplacement et à la nature des remblais doivent être synthétisées sous forme de deux documents cartographiques. En réalité, ces cartes ne peuvent être dressées qu'en fonction du choix des habitats, abordé

plus loin. Cependant, pour des raisons de clarté, elles sont présentées dès maintenant.

La carte topographique

La *carte topographique* indique les cotes des différentes parties du site après travaux de terrassement, depuis les terres émergées jusqu'à 2 m de profondeur sous l'eau. Si les données hydrogéologiques sont précises, on peut indiquer les cotes en m N.G.F. Mais s'il y a des doutes sur le niveau moyen réel de la nappe, il est préférable d'exprimer les cotes par rapport à ce niveau moyen.

FIG. 28. – Exemple de carte topographique

correspondant à la carte des groupements végétaux de la Fig. 27. Si les données hydrologiques sont insuffisantes, il est préférable d'exprimer les cotes par rapport au niveau moyen de la nappe (qui pourra être déterminé au cours du chantier d'extraction).

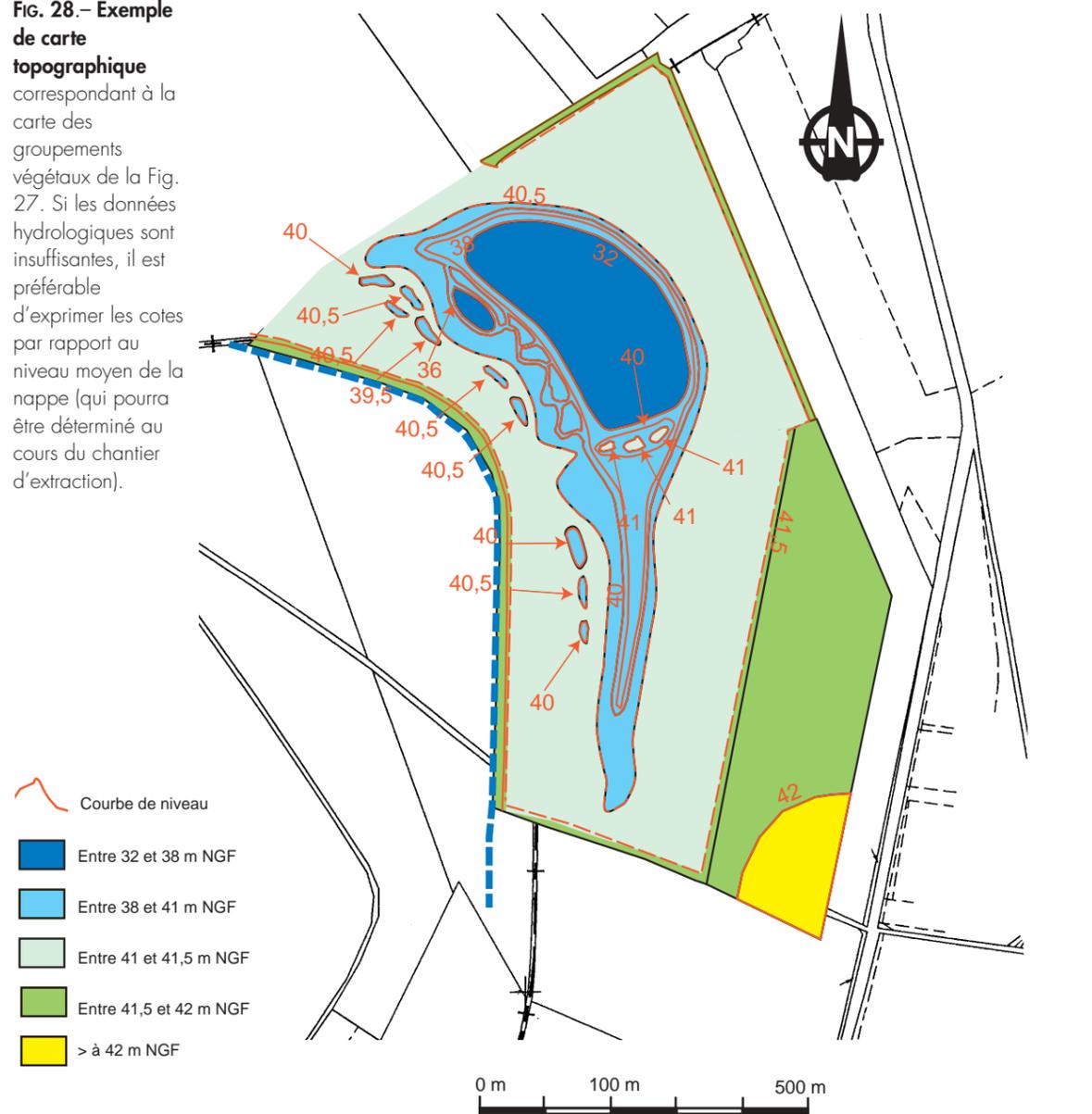
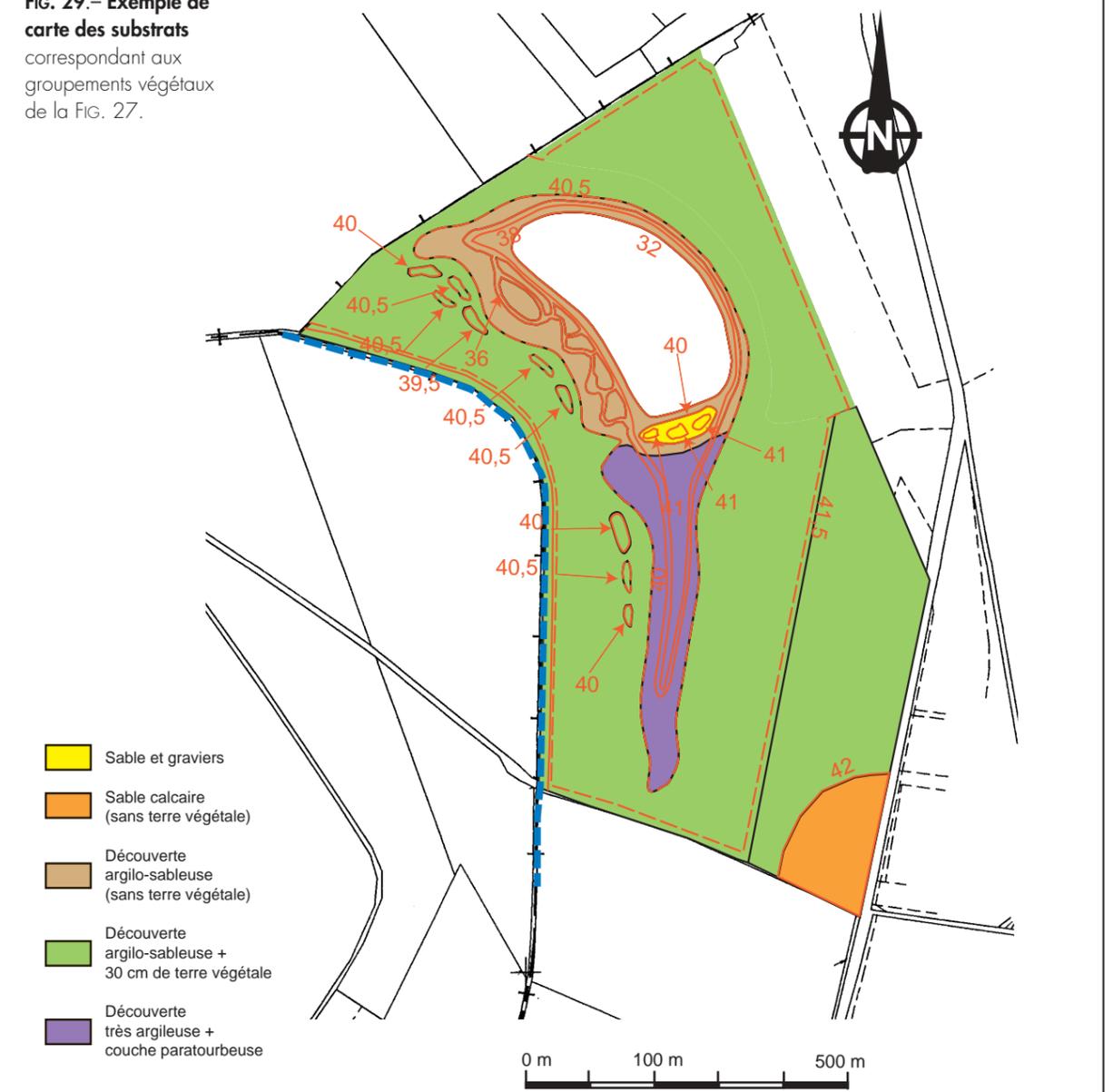


FIG. 29. – Exemple de carte des substrats

correspondant aux groupements végétaux de la Fig. 27.



Celui-ci pourra être précisé empiriquement au cours des travaux d'extraction.

L'intervalle entre les courbes de niveau peut être de 0,5 m ou 1 m. Pour plus de lisibilité, il est souhaitable :

1) de colorier chaque niveau topographique (par exemple 50 m à 50,5 m) en utilisant des teintes bleues pour les zones immergées, vertes ou violettes pour les zones humides et jaunes ou rouges pour les zones toujours émergées.

2) d'indiquer par un figuré approprié, les dénivelés abrupts : talus, microfalaises.

Pour améliorer la compréhension et l'utilisation lors des travaux, cette carte de référence pourra être complétée par des coupes réalisées au niveau de différents types de berges.

La carte des substrats

Cette carte est indispensable et doit être utilisable en pratique lors des phases de travaux. Elle indique selon les zones, les types de sub-

strat (découverte banale ou substrat particulier) et l'utilisation ou non de terre végétale. Pour cette dernière on distinguera l'épaisseur de terre végétale à régaler.

3.4. L'intégration du site à son environnement naturel

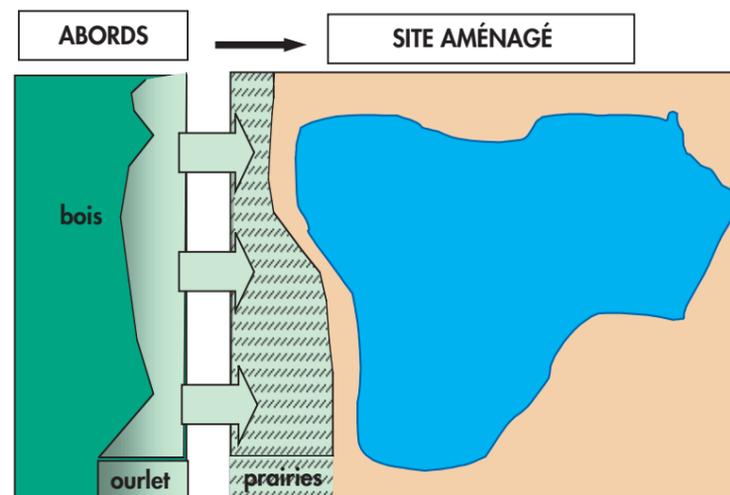
On doit prendre en compte la façon dont le site s'intégrera à ses abords immédiats. Les aspects hydrauliques de cette intégration sont suffisamment particuliers pour faire l'objet d'un chapitre séparé.

La zone humide nouvellement créée va venir s'insérer dans une mosaïque déjà présente de milieux naturels, semi-naturels ou franchement anthropiques. Cette mosaïque a dû être étudiée à l'occasion de l'étude d'impact et des expertises associées. On prendra appui sur ces données pour concevoir une transition intelligente entre le site « reconstruit » et ses abords.

Il est fréquent que des milieux et habitats d'intérêt soient présents aux abords, soit parce que leur valeur a justifié qu'ils soient exclus de l'exploitation, soit simplement qu'il n'ait jamais été question de les intégrer à l'exploitation.

A ce niveau détaillé de la conception du site, les milieux à considérer comme d'intérêt ne seront pas nécessairement extraordinaires. Il faut ici savoir apprécier l'environnement à un niveau local : autrement dit tous les milieux à caractère naturel et/ou d'exploitation extensive à semi-intensive (boisements, prairies, bocages, marais, cours d'eau non rectifié, plans d'eau...) sont des espaces à considérer dans les rôles qu'ils peuvent avoir pour les habitats du site et inversement que les habitats du site peuvent avoir pour eux.

FIG. 30. – La localisation des groupements végétaux sur le site aménagé doit tenir compte de l'existence de "réservoirs d'espèces" aux abords immédiats. Dans le cas illustré, on dispose les prairies reconstituées le long des ourlets existants, car ceux-ci sont riches en espèces prairiales qui pourront se propager spontanément.



3.4.1. LES « RÉSERVOIRS D'ESPÈCES » DANS L'ENVIRONNEMENT

Dans certains cas, des habitats abritant des espèces d'intérêt ont été repérés et/ou conservés aux abords immédiats du site : on recréera un habitat analogue sur le site, au niveau de ces habitats remarquables (ex. : dans les plaines autrefois occupées par des prairies, les ourlets herbacés des bois, lorsqu'ils sont fauchés, abritent souvent une flore constituée des espèces des anciennes prairies ; on aura donc intérêt à disposer des prairies le long de ces lisières).

Inversement, le site peut servir à réalimenter en espèces des habitats extérieurs trop fragmentaires ou dégradés (ex. : des petites zones humides bénéficieront de la présence d'une plus grande à proximité).

3.4.2. L'EFFET DE TAILLE

L'effet de taille joue lorsque deux superficies d'un même milieu mises côte à côte ou du moins à proximité acquièrent ensemble plus de valeur qu'elles n'en avaient séparément. L'effet se produit pour des habitats abritant des espèces ne colonisant leur milieu de prédilection qu'à partir d'une taille critique : espèces des boisements, espèces des roselières... Donc les boisements, roselières, etc. créés sur le site devront être localisés préférentiellement à côté des boisements, roselières, etc., des abords.

3.4.3. LA COMPLÉMENTARITÉ DES MILIEUX

La *synergie* par complémentarité des habitats concerne la disposition d'habitats différents les uns par rapport aux autres. Certaines associations d'habitats sont en effet plus attractives que d'autres. Cela vient du fait qu'elles permettent à de nombreuses espèces animales, d'assurer les différentes exigences de leur biologie (reproduction, recherche alimentaire, repos...) dans un même secteur et donc avec une dépense minimale d'énergie. Voici par exemple quelques cas qui pourront aider au choix et à la localisation des habitats en bordure du site (et aussi à l'intérieur) :

- ⇒ prairies + mares ou fossés
- ⇒ prairies + buissons (en particulier épineux)
- ⇒ prairies + lisières
- ⇒ roselières + saulaies
- ⇒ roselières + « clairières » aquatiques peu profondes
- ⇒ vasières + prairies humides
- ⇒ boisements + clairières

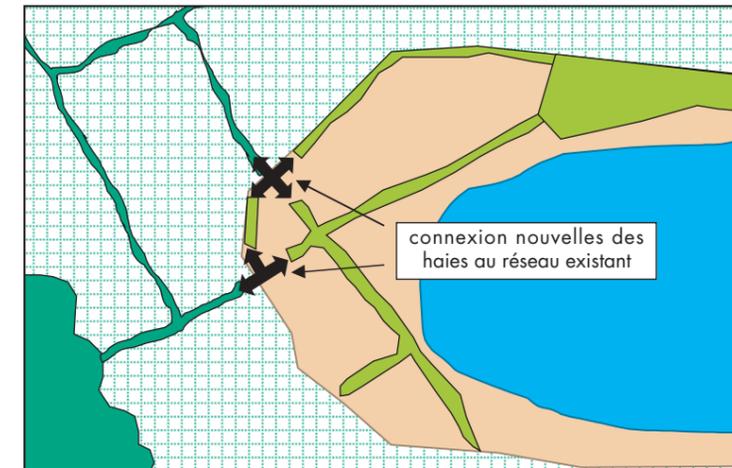


FIG. 31. – Connexion des haies et du boisement du site aménagé au réseau de haies existant.

⇒ îlots + hauts-fonds, vasières, grèves alluviales...

⇒ etc.

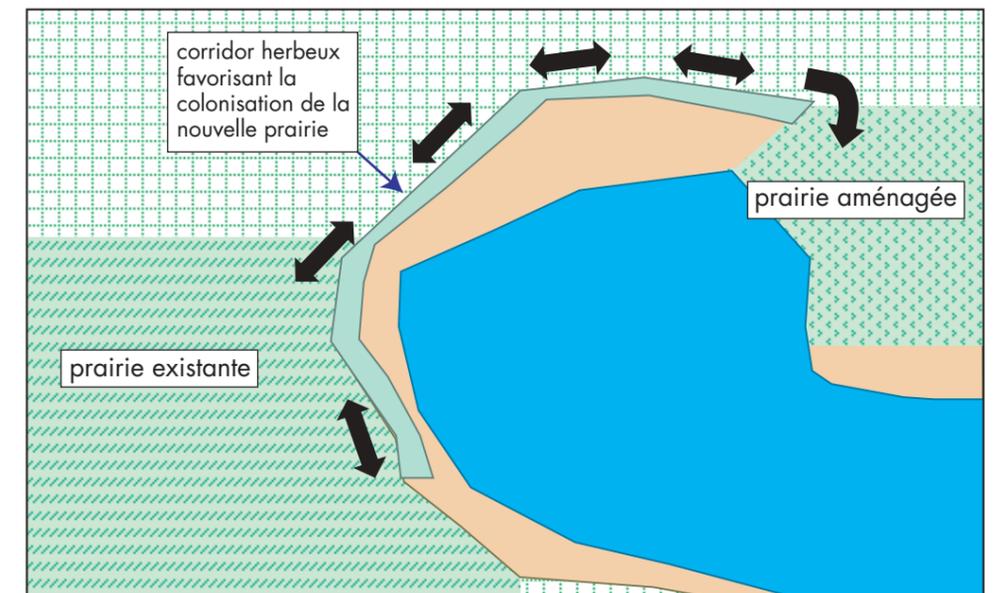
On trouvera, dans les chapitres consacrés à l'aménagement d'habitats précis sur des carrières, des idées de synergie entre milieux.

3.4.4. LA CONNECTIVITÉ DES HABITATS

La connectivité des habitats de même type est assurée par des habitats linéaires. Elle permet alors à certaines espèces de circuler ou de se propager le long de ces habitats linéaires.

Le cas bien connu est celui des boisements reliés par des haies : deux bois séparés de plusieurs centaines de mètres mais connectés par une haie (ou mieux un réseau de haies) ont une richesse biologique (insectes, araignées, micro-mammifères, oiseaux...) supérieure aux deux mêmes bois isolés.

FIG. 32. – Connexion par des corridors herbeux d'une prairie aménagée aux prairies existantes.



Ces liens ou *corridors* ne jouent pas identiquement pour tous les groupes écologiques. Par exemple, les espèces végétales strictement forestières ne se propagent que peu le long des haies.

L'autre cas classique de connectivité à laquelle il faut veiller est celui assuré par les habitats linéaires aquatiques : fossés, chemaux... (voir infra, le chapitre consacré à l'intégration hydraulique). Toutes les bandes herbeuses jouent aussi un rôle de corridor entre les prairies.

3.4.5. LA PERMÉABILITÉ DES FRONTIÈRES DU SITE

Un aspect complémentaire de la connectivité est la plus ou moins grande perméabilité des « frontières du site » vis-à-vis de tel ou tel groupe d'espèces. La perméabilité peut être souhaitée, par exemple dans le cas où il y aurait un marais adjacent ; inversement, on peut vouloir isoler le site vis-à-vis de prédateurs ou de colonisateurs indésirables (par exemple en creusant un fossé suffisamment large et profond).

3.4.6. LA PROTECTION CONTRE CERTAINS EFFETS INDÉSIRABLES DES HABITATS VOISINS

Certains habitats situés dans l'environnement immédiat peuvent avoir des caractéristiques indésirables vis-à-vis de milieux créés sur le site. On citera deux cas classiques :

- les habitats **eutrophisés** (cultures par exemple) dont la proximité avec des habitats volontairement oligotrophes (pelouses sableuses, prairies maigres...) est défavorable.

- les habitats fréquentés, bruyants etc., dont la proximité avec les zones de tranquillité (zones de nidification, de repos, de mue...) doit être évitée.

3.4.7. LES VOIES LOCALES DE DÉPLACEMENT DES ANIMAUX SAUVAGES

Il y a deux cas principaux où les voies de déplacement locales des animaux peuvent être signalées dans les expertises, pour leur importance écologique : il s'agit des grands mammifères (cerf, chevreuil, sanglier...) et des batraciens (migration nuptiale des crapauds). On remarquera que ces deux groupes donnent lieu sur les équipements linéaires (autoroutes, TGV...) à des mesures spécifiques (passages à faune, crapauducs).

Si donc, le site de carrière se trouve au niveau d'un passage de faune répertorié (ex. : plaine alluviale entre deux forêts de plateau), on veillera à ne pas l'interrompre, par des barrières ou des plans d'eau infranchissables. Le mieux sera d'ailleurs d'intégrer ce paramètre à la conception et de faciliter le passage des animaux concernés.

3.5. L'intégration hydraulique du site

Les travaux scientifiques menés sur les zones humides montrent qu'on ne peut comprendre ce qui s'y déroule en termes écologiques qu'en les replaçant dans un réseau où s'échangent les minéraux, les nutriments, les organes de dissémination des végétaux, les animaux... Le vecteur privilégié d'échange entre les zones humides est bien évidemment l'eau. C'est pourquoi, tout aménagement écologique doit comporter des mesures d'intégration du site à son environnement hydrique.

3.5.1. LES INCONVÉNIENTS D'UN SITE HYDRIQUEMENT ISOLÉ

La tendance répandue à la réalisation de sites isolés (en particulier isolés des crues) a ses justifications : préservation du peuplement de poissons introduits, stabilité des berges et des sols, préservation contre des eaux polluées, contrôle des phénomènes hydrauliques...

Cependant, d'une manière générale c'est une option qui présente plus d'inconvénients que d'avantages.

La dissémination végétale

La dispersion des végétaux est essentiellement assurée par trois vecteurs :

- le vent (espèces anémochores),
- les animaux et l'homme (espèces zoochores),
- l'eau (espèces hydrochores).

Ce dernier mode de dispersion est très répandu parmi les espèces végétales des milieux humides. Mais les sites isolés hydriquement ne peuvent être colonisés que par les anémochores et les zoochores : leur richesse en espèces des zones humides est donc beaucoup plus faible que celle des sites connectés où on laisse fonctionner la dynamique naturelle.

Si l'on veut enrichir le site, il faudra introduire les espèces désirées, ce qui peut être coûteux et n'est pas sans poser des problèmes (introductions indésirables, races non locales inadaptées...).

La colonisation végétale

D'autre part, on observe très fréquemment sur ces sites isolés hydrauliquement, l'effet fondateur. C'est à dire, qu'une ou deux espèces aquatiques à dissémination anémochore (ex. : massettes, saules...) réussissant à s'imposer, envahissent la zone humide et rendent difficiles l'implantation d'autres espèces.

Le colmatage

Un effet classique de l'isolement d'un site réside dans le colmatage des berges et du fond. En effet le ruissellement, qui circule superficiellement et dont la capacité de transport est faible, apporte aux plans d'eau essentiellement des sédiments fins (argiles et limons). Les cours d'eau et les crues, surtout les plus fortes, sont plus susceptibles d'apporter des sables et graviers. Aussi les gravières déconnectées, souffrent-elles d'un déficit sédimentaire pour les granulométries moyennes à fortes. Petit à petit, les pores des berges et du fond du plan d'eau se colmatent : la gravière qui était déjà isolée de la dynamique des eaux superficielles se trouve dès lors et de surcroît isolée des eaux souterraines.

Il en résulte des risques pour la qualité des eaux et des zones humides : déficit en oxygène, accumulation des polluants.

Ce phénomène de colmatage se produit naturellement dans les bras morts d'un fleuve quand ils sont coupés d'une communication directe avec le cours d'eau. Seules les fortes crues sont susceptibles de remobiliser les sédiments fins accumulés dans ces annexes fluviales.

3.5.2. CONNEXION HYDRIQUE DE LA CARRIÈRE SELON SA LOCALISATION PAR RAPPORT AU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Pour réussir l'intégration hydraulique du site à son environnement, la solution la plus efficace consiste à prendre modèle sur le mode de fonctionnement des zones humides naturelles. Or ce fonctionnement dépend de la position vis-à-vis du réseau hydrographique et dans les plaines alluviales de la dynamique fluviale, à savoir vis-à-vis des crues, des inondations, de la nappe, du chevelu pérenne ou intermittent de bras secondaires et fossés... La figure 33 distingue 5 types caractéristiques de localisation.

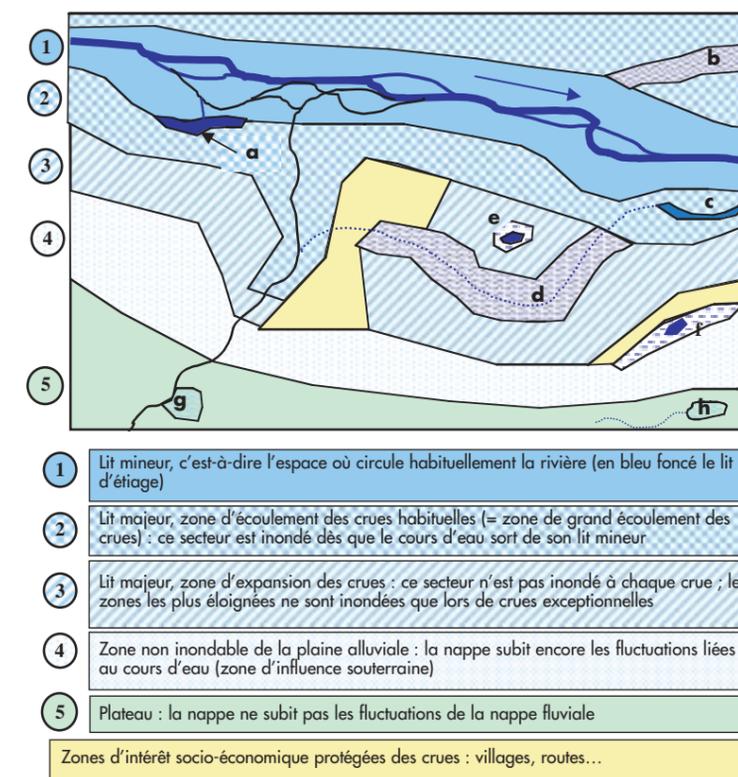
➤ (zone 1) : lit mineur

Les extractions en lit mineur ne sont plus autorisées en France, mais elles y ont été longtemps pratiquées.

➤ (zone 2) : lit majeur très régulièrement inondé (± zone de grand écoulement des crues)

Dans la zone (2), tout endiguement de la gravière entraîne une réduction du champ

FIG. 33. – Intégration hydraulique : différents types de zones humides et leur localisation par rapport au fonctionnement hydrofluvial.



Différents types d'annexes alluviales

- a : étang relié directement et en permanence
- b : chenal d'écoulement préférentiel des crues (noue)
- c : bras mort sans relation directe (= oxbow) connecté par les crues
- d : chenal d'écoulement préférentiel des crues déconnecté à l'amont et écoulement intermittent
- e : zone humide connectée uniquement par les crues
- f : zone humide déconnectée (encore en relation avec la nappe si elle n'est pas colmatée)

Zones humides de plateau

- g : en connexion avec une rivière
- h : isolée

d'expansion des crues, d'autant plus dommageable que les crues y sont fréquentes. Le courant se trouve automatiquement accéléré dans ce qu'il subsiste de chenal d'écoulement avec ce que cela suppose en matière d'érosion des sols. L'endiguement de la gravière dans cette zone (2) est d'autant plus regrettable, que c'est le type de localisation qui offre le plus de possibilités d'intégration hydraulique.

⇒ L'intégration de base consiste à laisser la gravière dans le champ d'inondation (les propriétaires demandent souvent que les plans d'eau soient protégés des inondations par des digues) ; ce type d'intégration s'accompagne souvent de protection pour empêcher la capture de la gravière par le cours d'eau.

⇒ Un type d'intégration plus poussée consiste à faire de la gravière une nouvelle annexe fluviale, connectée de façon permanente, mais protégée d'une capture par le cours d'eau. Les avantages et les risques de telles connexions sont à soupeser :

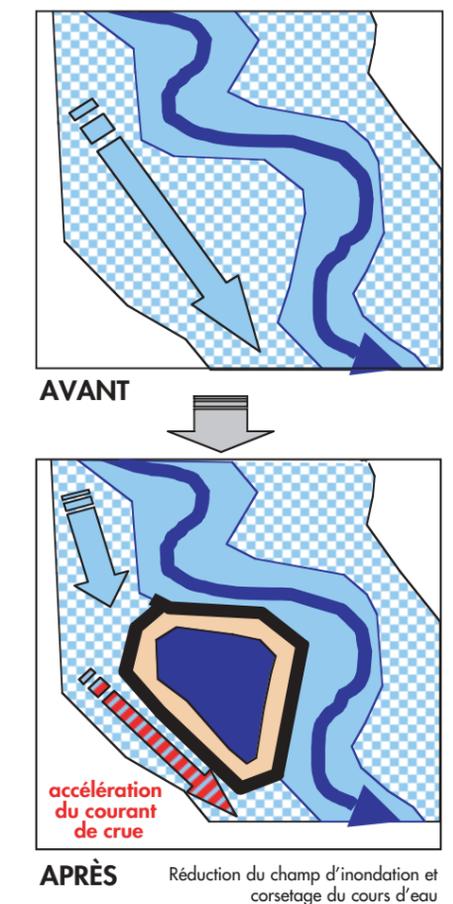


FIG. 34. – Intégration hydraulique : cas d'une gravière totalement endiguée.

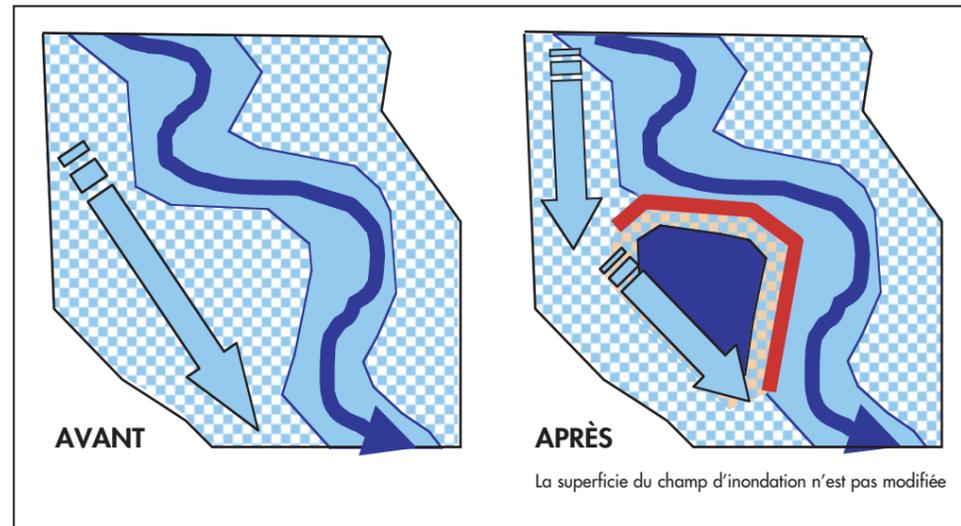


FIG. 35.- Intégration hydraulique : cas d'une gravière protégée contre la capture par le cours d'eau mais restant dans le champ d'inondation.

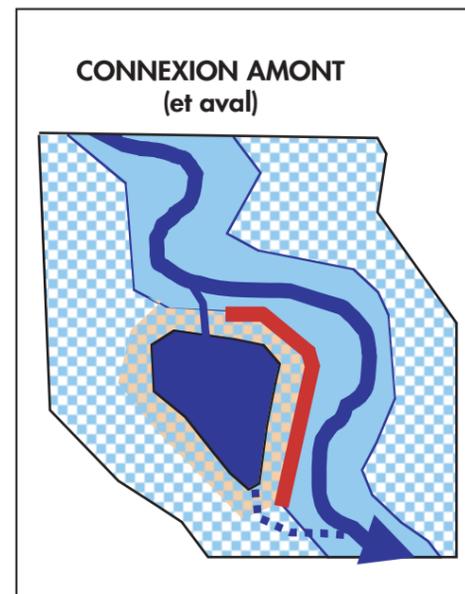


FIG. 36.- Intégration hydraulique : connexion amont (et aval) - sur les cours d'eau dynamiquement, risque de piégeage des sédiments grossiers.

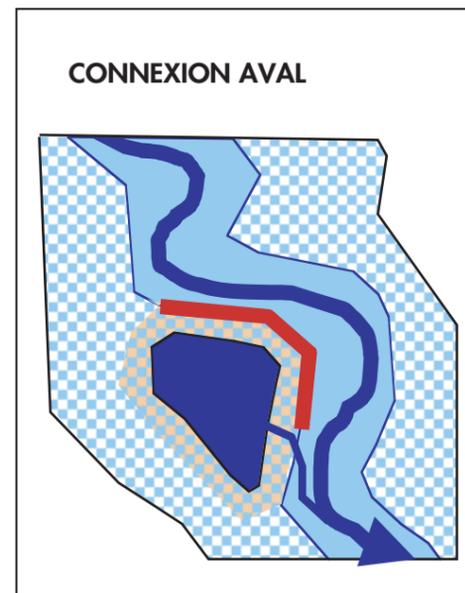


FIG. 37.- Intégration hydraulique : la connexion aval permet une communication avec le cours d'eau en réduisant les problèmes de piégeage des sédiments.

– les avantages résident (1) dans l'accroissement des habitats aquatiques directement reliés à l'hydrosystème et (2) dans la création d'une annexe jouant un rôle de refuge en cas de stress hydrique (pollution, fort courant...).

– les risques viennent du fait que des gravières ainsi connectées peuvent piéger et immobiliser la charge sédimentaire grossière (gravier, cailloux...), laquelle fait défaut à l'aval du cours d'eau, entraînant des dysfonctionnements morphodynamiques : surcreusement du lit, érosion des berges... Ces phénomènes ne concernent cependant que les cours d'eau dynamiquement où la charge grossière est significative (type Allier, Loire amont...).

– Inversement, sur les fleuves à charge fine prédominante, si on met en place des systèmes réduisant l'entrée de sédiments dans la gravière, on réduit le débit du cours d'eau sans réduire la charge transportée : la sédimentation excessive peut alors poser des problèmes en particulier dans le chenal de navigation (Cette question qui trouve des solutions est une de celles qu'ont à résoudre les néerlandais dans leurs projets localisés sur le Waal).

– On notera enfin, qu'une connexion par l'aval seulement réduit les entrées de sédiments dans la gravière.

⇒ L'intégration la plus poussée consiste à intégrer directement la gravière dans le lit mineur du cours d'eau, extrêmement réduit dans la plupart de nos fleuves et rivières, corsetés et endigués. Les digues situées entre la gravière et le cours d'eau sont arasées et reportées sur le bord externe de la gravière. Ces travaux consistent à

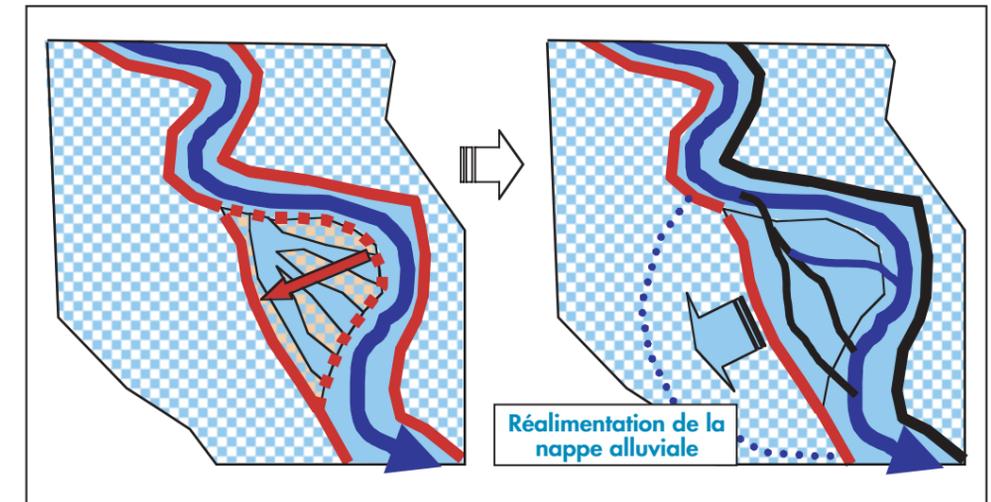


FIG. 38.- Intégration hydraulique : utilisation de gravières pour agrandir le lit mineur du cours d'eau.

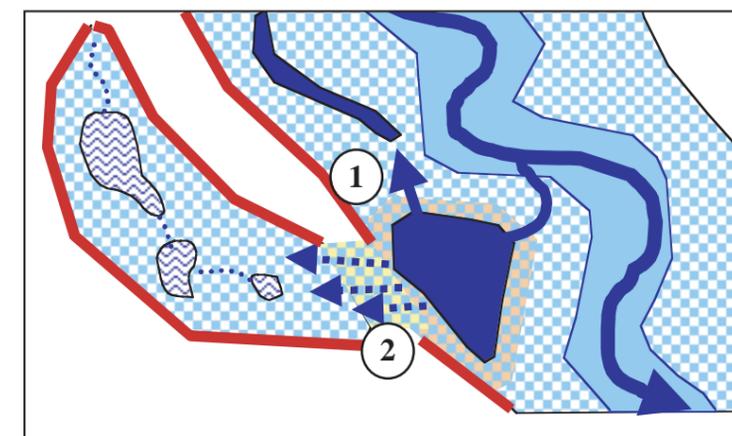
créer artificiellement une capture de la carrière par le cours d'eau. Afin de réaliser une opération qui apporte un plus au fonctionnement hydrologique, il faut laisser jouer les phénomènes morphodynamiques naturels (érosion des berges, sédimentation).

Cette solution est actuellement assez difficile à mettre en place en France : problèmes fonciers, législation sur les eaux, réticences diverses... Elle sera plus facile à envisager dans le cadre de programmes de maîtrise des crues ou de réhabilitation globale de tronçons de plaine alluviale comprenant des complexes de gravières. C'est par exemple le cas du programme néerlandais, mené par le RIZA, sur 50 km de la Meuse dans la province du Limbourg.

FIG. 39.- Intégration hydraulique : reconnexion d'annexes fluviales isolées :

⇒ La reconnexion d'autres annexes fluviales constitue une solution de grand intérêt écologique en termes de bon fonctionnement de l'hydrosystème. Cette reconnexion peut présenter deux aspects :

- 1) la réalimentation permanente d'une annexe isolée, en cours de dégradation (colmatage, manque d'oxygénation des eaux, pollution...);



– 2) la réintégration dans le champ d'inondation d'une zone humide en voie d'assèchement.

A noter que sur les fleuves présentant une charge sédimentaire fine, le rôle de piège pour les sédiments fins et éventuellement pollués peut être mis à profit lorsque l'on veut utiliser la gravière pour reconnecter des annexes fluviales : on peut ainsi les alimenter en eau de qualité et éviter qu'un apport excessif de sédiments ne les colmate.

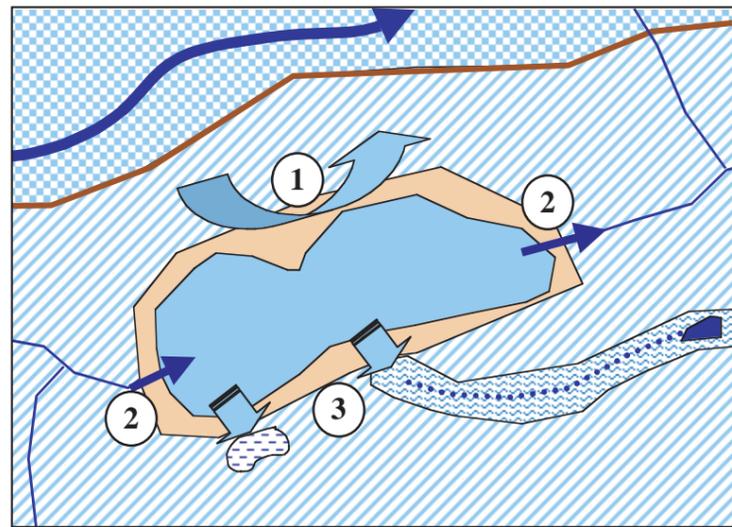
⇒ (zone 3) : lit majeur peu fréquemment inondé (± zone d'expansion des crues)

En zone 3 le maintien de la gravière dans le champ d'inondation est là aussi souhaitable. En effet ce champ d'expansion des crues est particulièrement utile pour stocker les eaux lors des fortes crues.

Cette zone modérément à faiblement inondable possède généralement différentes catégories de petites zones humides : fossés, petites dépressions et chenaux, parfois mares ou étangs alimentés par la nappe et/ou les crues. Ces zones sont souvent dégradées : fossés rectilignes dénués de végétation, secteurs humides très enrichis en nitrates, remblaiement partiels... L'exploitation d'une gravière peut être l'occasion d'améliorer l'alimentation et la qualité en eau de ce réseau :

- ⇒ réalimentation des fossés : les eaux issues du plan d'eau de la gravière.
- ⇒ remise en zone inondable de zones humides isolées.
- ⇒ remise en eau de chenaux d'inondation, de noues déconnectées des crues et/ou de la nappe par colmatage.

FIG. 40. – Types d'intégration hydraulique d'une gravière dans la zone d'expansion des crues.



- ① Laisser la gravière dans le champ d'expansion des crues.
- ② Connecter / reconnecter le réseau de fossés ; améliorer la qualité de leurs eaux
- ③ Reconnecter une zone humide (noue, chenal, dépression...) en voie de dégradation (isolée, colmatée, polluée...)

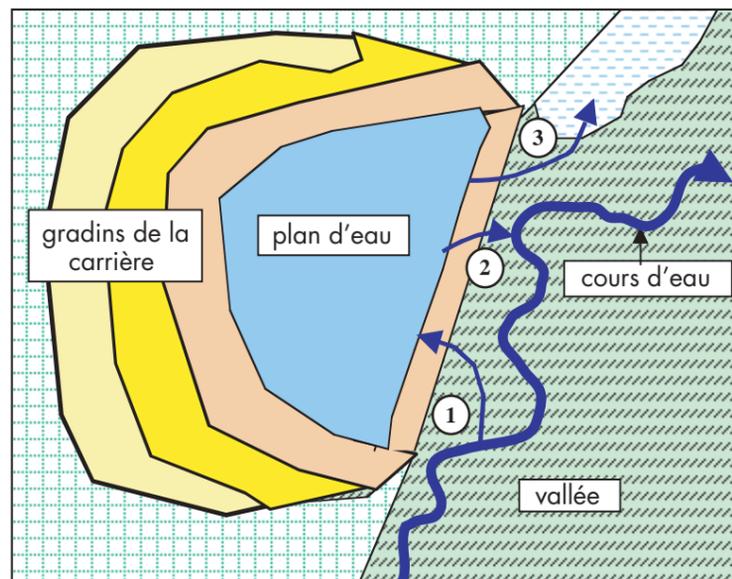


FIG. 41. – Intégration hydraulique : cas d'une carrière de roches massives à flanc de vallée.

- ① communication amont, avec entrée des eaux de la rivière dans le plan d'eau : un système de contrôle du débit d'entrée peut alors être mis en place ;
- ② communication aval, en mettant en place un émissaire du plan d'eau.
- ③ alimentation d'une zone humide latérale déconnectée de la rivière et de la nappe et en cours d'assèchement (petit marais, prairies humides, zone tourbeuse...).

(18) Encore appelé fuseau de divagation, espace de liberté, espace de mobilité...

➔ (zone 4) : secteur non inondable situé dans la zone d'influence souterraine du fleuve

Bien que ce secteur ne soit pas inondable, les gravières peuvent atteindre la nappe alluviale. Dans certains cas, les eaux de la nappe phréatique affleurant dans le plan d'eau pourront être utilisées à la réalimentation de zones humides en cours d'assèchement et située topographiquement plus bas (cf. FIG. 40).

➔ (zone 5) : le plateau

Sur les plateaux, les carrières concernées seront des carrières de roches massives ou de sablons. Dans certaines conditions de bilan hydrique positif, il se crée des zones humides sur le carreau voire un plan d'eau. On peut distinguer le cas où la carrière est installée à flanc de vallée, à proximité d'une petite rivière et le cas où elle forme un impluvium. Seul le premier cas suscite une intégration hydraulique. La figure 41 montre les trois cas que l'on peut alors envisager.

3.5.3. UTILISER UN COMPLEXE DE GRAVIÈRES POUR CRÉER UNE ZONE DE DIVAGATION DU COURS D'EAU

Le fuseau de liberté⁽¹⁸⁾ d'un cours d'eau est l'espace dans lequel les sédiments alluviaux peuvent être remobilisés par les mouvements latéraux et longitudinaux des flux d'eau. En théorie, c'est l'espace dans lequel peut divaguer le cours d'eau au gré des modifications du lit mineur : progression des méandres d'amont en aval, réutilisation d'un chenal délaissé, abandon du bras principal pour un bras secondaire... En pratique, même dans les plaines inondables, le lit mineur est souvent endigué et les divagations du cours d'eau sont contrôlées. L'énergie qui ne peut pas se dissiper dans ces mouvements latéraux, est alors dérivée dans le surcreusement du lit et l'érosion des berges.

Dans le cadre de la réhabilitation d'un secteur de plaine alluviale comprenant un complexe de gravières, on pourra envisager de réserver une partie d'entre elles à la création d'une zone de divagation. Dans ce cas, on laissera complètement jouer la dynamique : érosion et sédimentation. Outre les avantages en termes de fonctionnement hydrique, on peut attendre des bénéfices en termes d'habitats. Les milieux pionniers (grèves alluviales, bancs sablo-graveleux, talus dans les sédiments...) qui sont en forte régression sur nos cours d'eau, devraient pouvoir être créés et entretenus spontanément avec une solution de ce type.

Afin d'éviter de détourner le cours d'eau, le débit d'entrée dans cet espace de liberté doit être contrôlé : digues submersibles, épis transversaux, vannes... Si on ajoute également un système de contrôle du débit à la sortie, la zone de divagation

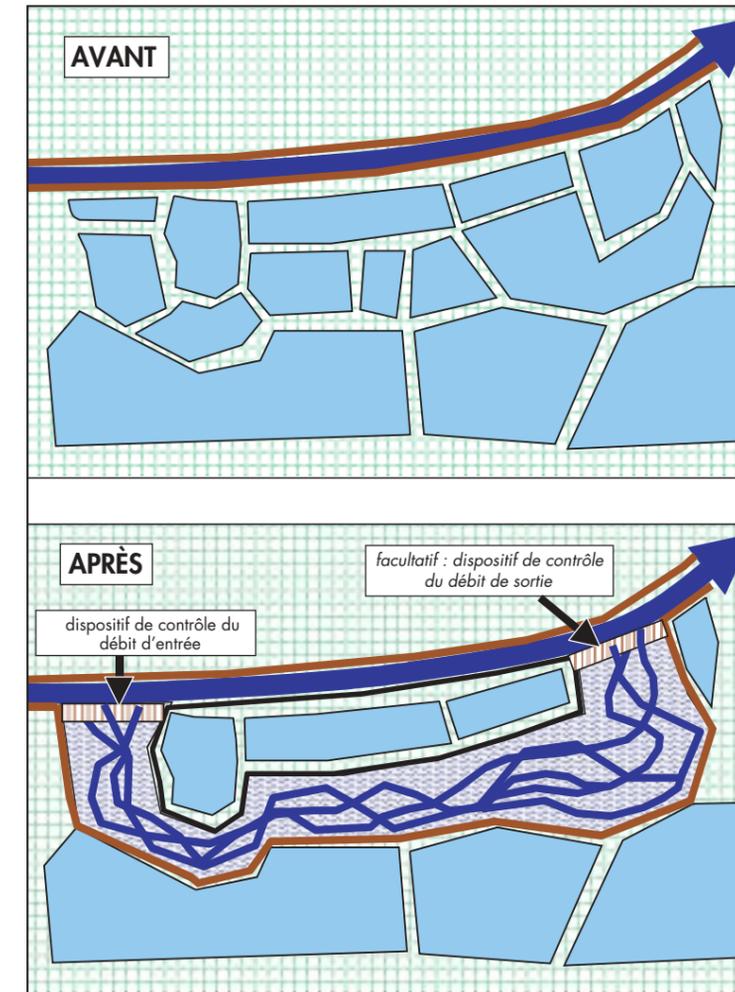


FIG. 42. – Projet ambitieux d'intégration hydraulique concernant un ensemble de gravières. Il est possible de créer une zone de divagation du cours d'eau en agrandissant son espace de liberté.

peut alors aussi jouer un rôle de stockage des eaux en cas de forte crue. Cependant, la fonction de stockage des crues ne reste compatible avec les objectifs écologiques qu'à condition que le rythme des mises en eau mime à peu près les rythmes naturels (on ne doit pas par exemple ne mettre en eau qu'à l'occasion des fortes crues).

En ce qui concerne l'énergie des eaux entrant dans ce nouveau bras du fleuve, on peut décrire deux options diamétralement opposées :

- 1) On peut laisser entrer des crues très énergiques afin de maintenir des formations pionnières (saulaies, grèves, bancs de sables...) ; mais il faut éviter une entrée brusque des eaux provoquant une vague d'inondation dévastatrice ;
- 2) On peut privilégier des eaux stagnantes à faiblement courante formant une sorte de bras secondaire du cours d'eau : les habitats seront alors des nupharaies, des roselières, des aulnaies... Dans ce cas, le défaut à éviter est une lame d'eau trop importante que ne toléreraient que peu d'espèces, surtout si elle est associée à une eau stagnante donc pauvre en oxygène.

3.6. La gestion des accès et de la fréquentation

La plupart des sites aménagés ont vocation à être fréquentés. Il peut s'agir d'une ouverture franche au public – découverte « nature », promenade, loisirs légers... – ou d'une fréquentation plus limitée. Dans tous les cas, il faut concevoir le projet de manière à ce que la fréquentation du site reste compatible avec les objectifs écologiques affichés.

3.6.1. LES ASPECTS NÉGATIFS ET POSITIFS DE LA FRÉQUENTATION

Sans même parler ici des activités de loisirs (chasse, pêche, sports nautiques...), la fréquentation, lorsqu'elle est excessive (surfréquentation) a des effets pervers sur les milieux naturels : dérangement des espèces animales (beaucoup d'espèces craignent la présence humaine, même de loin), bruit, piétinement, cueillette intempestive, dépôt de déchets et détritus...

Pourtant, en dehors de certains cas particuliers, la « sanctuarisation » totale d'un site n'est pas forcément la meilleure solution. En effet, les espaces totalement interdits au public peuvent être mal perçus par l'opinion voire susciter des réactions de rejet. Il ne faut pas non plus négliger une fréquentation « sauvage » favorisée par l'attrait de l'interdit.

D'un point de vue pédagogique et scientifique, l'ouverture au public dans un but d'observation des milieux naturels est très positive. Elle demande des mesures particulières, mais elle renforce le projet dans ses objectifs de servir l'intérêt général. Pour l'entreprise, il est également valorisant de faire découvrir ses réalisations.

3.6.2. QUELLE SERA LA NATURE DE LA FRÉQUENTATION DU SITE ?

La conception des accès et des cheminement, la disposition des habitats, etc. dépendent du type de fréquentation que l'on attend. Il y a d'abord la question de l'intensité de cette fréquentation. Elle ne sera pas la même selon que le site sera clos ou ouvert, en zone rurale ou urbaine, de grande ou de petite taille...

Le type de public auquel on peut s'attendre a aussi son importance :

- aura-t-on affaire à un public respectueux de l'environnement ou bien des risques de dégradation ou de vandalisme sont-ils à craindre ?
- le site sera-t-il ouvert à tout public ou réservé à des groupes ou personnes autorisées (scolaires, naturalistes, personnel de l'entreprise...) ?

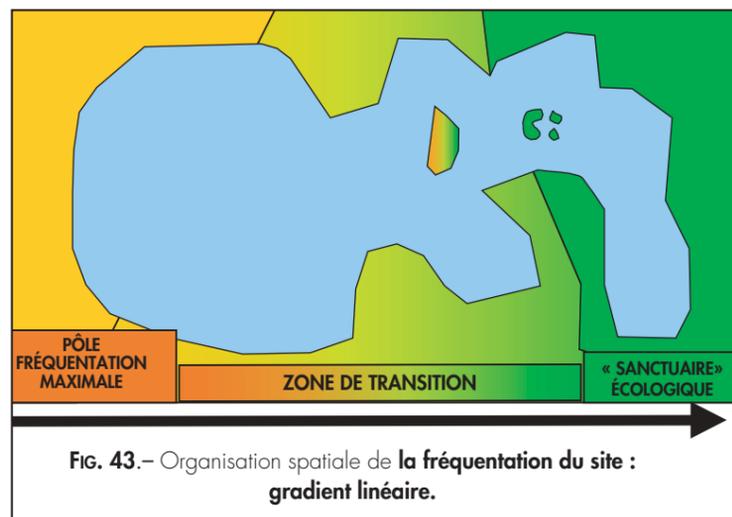


FIG. 43. – Organisation spatiale de la fréquentation du site : gradient linéaire.

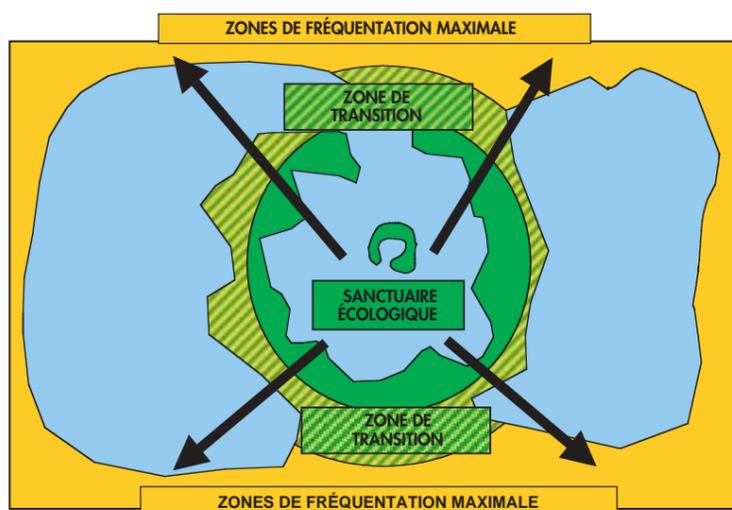


FIG. 44. – Organisation spatiale de la fréquentation du site : gradient centrifuge.

- y aura-t-il des visites encadrées par un animateur ?
- s'agira-t-il d'un site géré avec entrée contrôlée et éventuellement payante ?
- y aura-t-il des pêcheurs ?
- le site sera-t-il ouvert à la chasse avec les problèmes de sécurité que cela suppose ?
- s'il s'agit d'un site à vocation multiple, quelle sera l'utilisation des secteurs non écologiques ?
- etc.

3.6.3. QUELQUES PRINCIPES UTILES

Différents degrés d'accessibilité

De manière générale, il est utile de prévoir un gradient de fréquentation en fixant d'emblée :

- 1) une zone « sanctuaire » centrale (gradient centrifuge) ou disposée à une extrémité (gradient linéaire) ;

- 2) une zone de fréquentation maximale aussi éloignée que possible de la zone « sanctuaire » ;
- 3) une gamme de milieux d'accessibilité intermédiaire entre les deux.

Préférer l'incitation à la coercition

Tant que cela est possible, il vaut toujours mieux guider astucieusement le public vers des zones d'où il pourra observer le site sans frustration que de lui interdire ostensiblement l'accès aux zones sensibles. Cette dernière façon de faire a d'ailleurs pour effet indésirable de signaler aux personnes indécates les zones sanctuaires.

Pour inciter le public à se diriger préférentiellement vers les zones qui lui sont destinées, on peut jouer sur différents facteurs :

- organiser l'accès au site (routes, parkings...)
- organiser les cheminements au sein du site afin d'éviter que les gens ne se fassent leurs propres itinéraires ;
- utiliser les barrières naturelles difficilement franchissables : haies (épineuses en particulier), fossés ;
- en revanche, éviter au maximum les clôtures, les panneaux d'interdiction...

Jouer sur les effets psychologiques

Un certain nombre d'attitudes psychologiques sont suffisamment fréquentes dans la population pour qu'elles puissent être utiles à la gestion de la fréquentation. Citons par exemple :

- l'attractivité que représentent les plans d'eau.
- la sécurité que procurent des sentiers balisés.
- l'impression d'hostilité que donnent certaines formations végétales : la majorité des personnes ont peur de pénétrer dans une nature touffue d'aspect sauvage.

3.6.4. LA CONCEPTION DES ACCÈS ET DES CHEMINEMENTS

Accès motorisé

Pour un meilleur contrôle de la fréquentation, il vaut mieux prévoir un nombre réduit d'accès au site. Cependant, si plusieurs secteurs de fréquentation sont prévus (coins de pêche en particulier), mieux vaut prévoir leur desserte automobile : en effet, d'une part cela évite que les gens ne se fraient un chemin à travers des zones sensibles, d'autre part de nombreuses espèces animales craignent moins les véhicules que les piétons.

A chaque accès doivent correspondre des possibilités de se garer, (1) pour éviter des station-

nements indésirables, (2) parce que les parkings (même sommaires) sont une des manières d'attirer le public vers les secteurs qui lui sont réservés. Sauf pour l'entretien et la gestion du site, l'accès des véhicules motorisés à l'intérieur du site ne doit pas être prévu.

Organisation des cheminements

L'organisation des cheminements fait partie de la phase de conception car elle est étroitement liée à la répartition des habitats et peut même en conditionner la disposition. D'ailleurs, si on laisse les cheminements s'organiser de manière sauvage, on risque de fragiliser des secteurs sensibles : or il est plus difficile de changer des habitudes prises que de les suggérer dès le départ. L'objectif des sentiers est triple :

- 1) il s'agit de satisfaire la curiosité et l'envie d'observer du public ;
- 2) de conduire à des endroits stratégiques : observatoires, lieux de pêches, parkings...
- 3) d'éviter que le public ne se dirige vers des zones sensibles.

Quelques règles aideront à la conception des cheminements :

- 1) ne pas créer de sentiers sans issue, qui inciteraient les gens à improviser un chemin de retour.

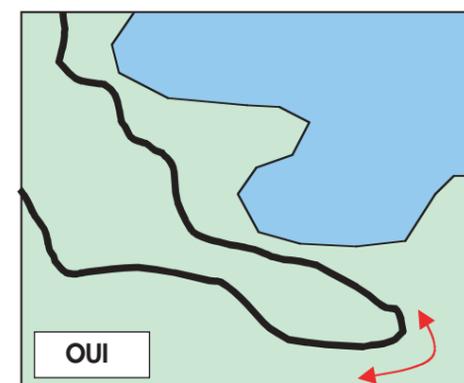


FIG. 45. – Conception des cheminements : éviter les chemins sans issue.

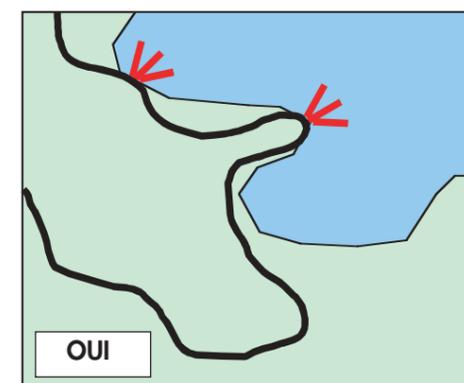
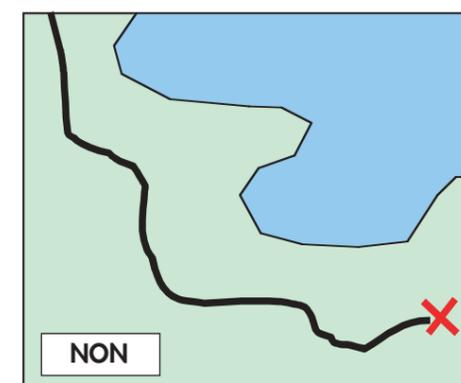
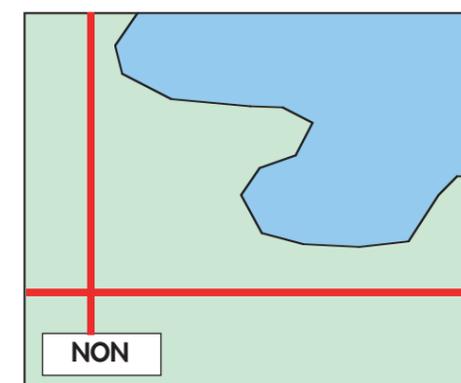


FIG. 46. – Conception des cheminements : créer des sentiers attrayants.



- 2) faire des sentiers attrayants, offrant différents aspects du site et des points de vue sur le plan d'eau ; éviter les sentiers rectilignes plus ennuyeux.
- 3) anticiper les trajets spontanés que le public aura tendance à suivre (le plus court est généralement celui qui est préféré).

3.6.5. LES BARRIÈRES ET ÉCRANS NATURELS

Il se peut que la clôture de certaines zones soit indispensable. Cependant, cet aspect des choses est un peu prématuré au stade de la conception. En revanche, la disposition d'éléments naturels servant de barrières ou d'écrans doit d'ores et déjà être pensée. La barrière naturelle peut dans un ordre croissant de contrainte :

- 1) canaliser le public
- 2) limiter l'accès à un secteur
- 3) empêcher complètement la pénétration du public

Les écrans servent à protéger les animaux (les oiseaux aquatiques en général) du dérangement visuel et/ou sonore. Les éléments naturels utilisables sont les suivants :



- la végétation dense et touffue (fourrés, buissons, hautes herbes, roselière...).
- les arbustes épineux (prunellier, aubépine, nerprun, groseillier à maquereaux, ronciers...) en haie ou en fourrés.
- les friches à orties ou à chardons épineux sont également efficaces.
- les fossés, plus ou moins larges et profonds (attention cependant à la sécurité du public et en particulier des enfants).
- les levées de terre, qui font de surcroît d'excellents écrans sonores.

3.6.6. ASSURER LA SÉCURITÉ DU PUBLIC

Un certain nombre de substrats et d'accidents topographiques présentent des risques pour le public. Les administrations sont de plus en plus sensibles à cet aspect. Citons :

PLANCHE IV. (M. COURCOUX). – Organisation de l'espace, gestion des accès et de la fréquentation. La fréquentation du site doit être pensée dès l'étape du plan d'aménagement, même si la réalisation dans le détail relève de la phase des travaux et des aménagements. On voit, sur cette illustration d'un site aménagé pour le public, différents éléments importants relevant de la conception.

- 1) La fréquentation concerne essentiellement la partie gauche du site, les milieux sensibles formant une zone sanctuaire dans la partie droite.
- 2) La zone d'accueil est nettement identifiée avec un mobilier adapté : panneaux d'information, poubelles, bancs...
- 3) la fréquentation motorisée est dissuadée : parking au premier plan, barrières en chicane, impossibilité de mettre un canot à moteur à l'eau...
- 4) deux niveaux de visite ont été prévus : (a) pour des personnes ne désirant pas trop marcher, la zone d'accueil permet d'observer et de comprendre le site, (b) les visiteurs plus curieux sont invités à suivre un sentier à gauche qui les mènera jusqu'à un observatoire aménagé à leur intention.
- 5) les moyens coercitifs (clôtures, panneaux d'interdiction) sont évités et une canalisation du public utilisant les haies, les fossés, les boisements, les chemins, etc., est préférée.

- les fines de décantation non asséchées ;
- les fronts de taille et talus raides ;
- les fossés...

Cependant ces biotopes existent dans la nature et ont leur rôle écologique. Hormis les mesures d'information et de sécurisation à

prendre après les travaux, on peut dès la conception utiliser les fourrés arbustifs et haies épineuses pour barrer l'accès à ces zones. En ce qui concerne les talus raides, où nichent des espèces de valeur comme l'hirondelle de rivage ou le martin-pêcheur, on peut les réaliser sur des îles.

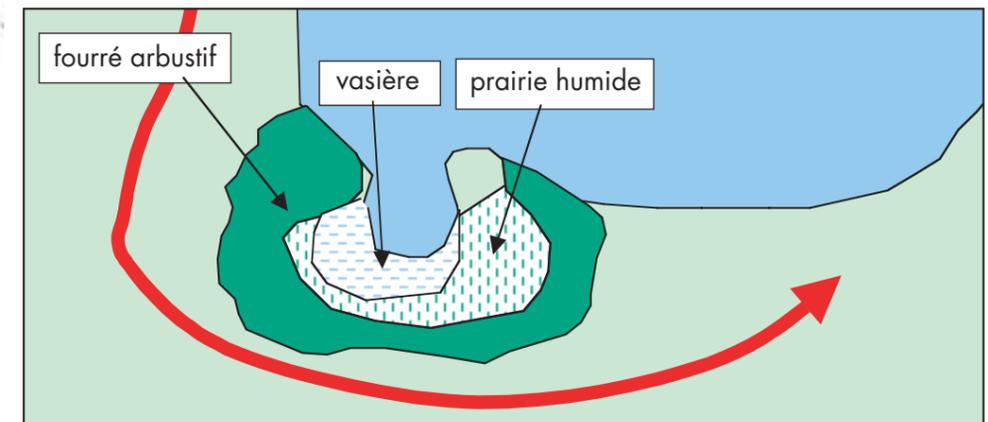


FIG. 47. – Utilisation d'un fourré arbustif pour canaliser le public à l'écart d'un secteur sensible (zone d'alimentation et de repos pour des oiseaux aquatiques).

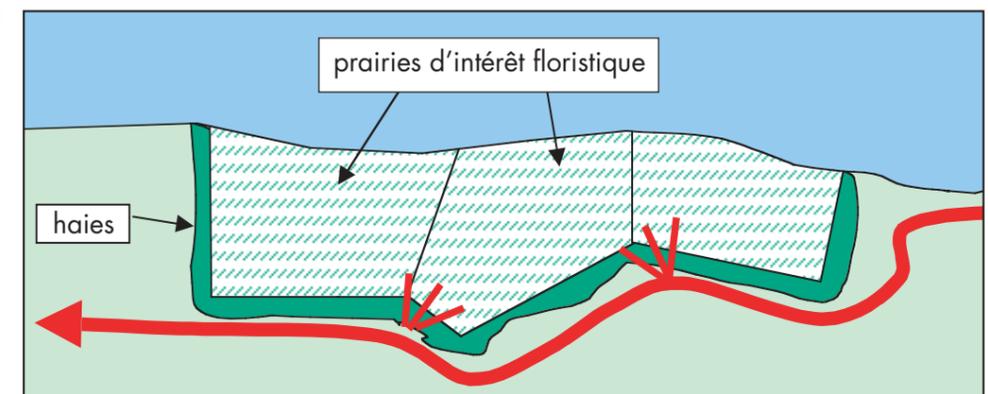


FIG. 48. – Utilisation de haies pour limiter l'accès et le piétinement dans des prairies d'intérêt floristique.

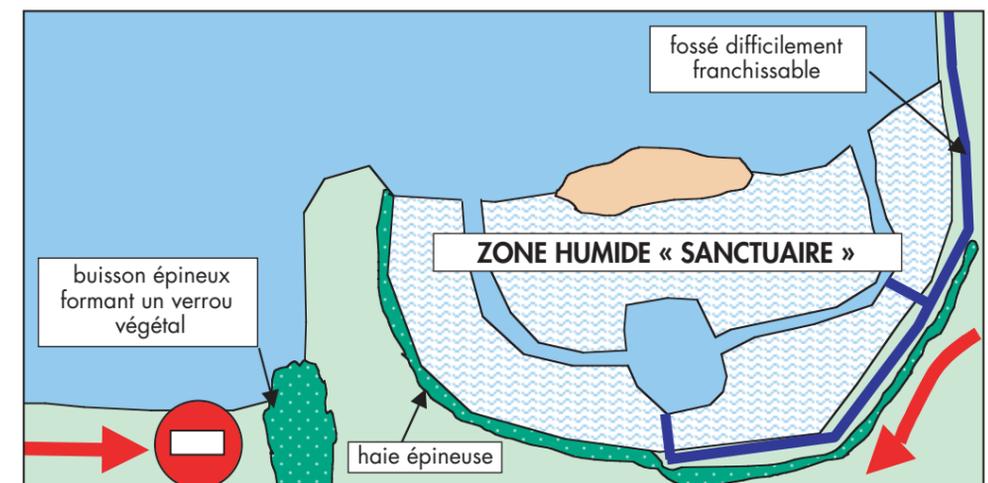


FIG. 49. – Utilisation d'arbustes épineux et de fossés pour protéger une zone "sanctuaire".

4

4.1 FAIRE UN AVANT-PROJET DÉTAILLÉ (APD)	72
4.2 ORGANISER LE CHANTIER	72
4.3 LE PROFILAGE DE LA BERGE	73
4.4 L'UTILISATION DES SUBSTRATS DISPONIBLES ET LA RECONSTITUTION DES SOLS	84
4.5 LA VÉGÉTALISATION	90
4.6 LES TECHNIQUES PARTICULIÈRES LIÉES À LA GESTION HYDRAULIQUE	96
4.7 L'UTILISATION DES BASSINS DE DÉCANTATION	102
4.8 LES TECHNIQUES PARTICULIÈRES LIÉES À LA RESTAURATION DES ANCIENNES GRAVIÈRES	103
4.9 L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ANIMALES	104
4.10 LES ÉQUIPEMENTS DESTINÉS AU PUBLIC	106

■ Les travaux d'aménagement et de végétalisation

La phase des travaux est prépondérante. C'est très souvent d'elle que dépendent les succès ou échecs de l'aménagement. Pour ne prendre qu'un exemple caractéristique, dans le cas des zones humides, on ne peut trop insister sur l'importance de caler les terrains par rapport au niveau d'eau, même si cela doit amener à modifier en partie les plans d'aménagement.

Cette dernière remarque n'est pas anodine : la phase des travaux n'est pas une simple application du plan d'aménagement, elle doit en être une interprétation, adaptée à la réalité du chantier et du terrain. Rappelons à cet égard que la remise en état est un chantier qui se déroule parallèlement à l'exploitation, "au jour le jour". La remise en état comme l'exploitation est un chantier mobile permanent qui dure toute la vie de la carrière.

La nécessité d'interpréter le plan d'aménagement plutôt que de le respecter dans le détail apparaîtra inmanquablement, même si les meilleures expertises ont été réalisées sur le site. Si telle ou telle caractéristique de l'aménagement s'avère impossible à réaliser comme prévu pour des raisons techniques incontournables, on pourra essayer de la réaliser ailleurs ou de la compenser par un aménagement similaire, dans le même esprit que ce qui était prévu initialement.

Des objectifs à la conception et de la conception aux travaux : l'exemple d'une roselière

Au premier niveau de la conception, les objectifs fixés ont amené à décider qu'une grande roselière inondée était à créer.

Au deuxième niveau, celui du plan d'aménagement, on a fixé la taille de la roselière, son niveau topographique par rapport à la piézométrie, sa localisation (en fonction de considérations internes au site, mais aussi de la connexion avec des milieux limitrophes), les substrats à utiliser... ; le plan d'aménagement indique à l'intérieur de la roselière, des "clairières en eau" ainsi que des chenaux ; il est conseillé de planter des rhizomes de phragmites.

Au troisième niveau, celui des travaux, on respectera la taille, la localisation et la topographie de la roselière ; cependant la localisation précise des clairières et chenaux pourra varier selon les facilités du chantier ; on pourra modifier les contours de la roselière, mais on respectera sa proximité voulue avec une zone humide bordant le site (si celle-ci existe encore). La technique d'introduction des phragmites pourra être remise en cause si une technique moins coûteuse existe, mais on respectera le fait de n'introduire que des végétaux d'origine locale ; la densité de plantation sera fixée à ce stade, par exemple on conseillera un plant/m²...

(19) On évitera de façon générale les travaux entre mars et fin juillet sur des sites occupés par des oiseaux nicheurs.

4.1. Faire un Avant-Projet Détaillé (APD)

Dans la majorité des cas, la phase de travaux se déroule plusieurs années après la conception du plan de remise en état présenté au chapitre V de l'étude d'impact. On considèrera donc ce dernier comme une sorte d'Avant-Projet Sommaire (APS) et après l'ouverture de la carrière, lorsque le chantier de remise en état se mettra concrètement en place, on aura tout intérêt à mettre « noir sur blanc » les opérations à réaliser dans le cadre d'un Avant-Projet Détaillé (A.P.D.). Celui-ci peut être réalisé « en interne » cependant la consultation d'écologues spécialisés est recommandée.

L'A.P.D. nécessite un plan topographique précis du site et doit être accompagné de plans détaillés des opérations à effectuer. Son contenu complet suit idéalement le plan suivant :

- 1) Définition du schéma d'aménagement général, comprenant un rappel des objectifs en termes très concrets et un zonage avec métrage précis des différents milieux à créer.
- 2) Opérations préalables aux travaux de terrassement (délimitation de secteurs à préserver, piquetage de lisières fragiles, déplacement d'espèces végétales, débroussaillage de certaines zones, gyrobroyage...).
- 3) Description technique des travaux de terrassement : mouvements de matériaux, décapes particuliers, stockages intermédiaires, profilage des berges, création d'îles, reconstitution de sols, etc. : à ce niveau les cubatures et caractéristiques des matériaux à mettre en œuvre doivent être décrits avec précision, car il se peut que la réalité du chantier fasse évoluer les prévisions du plan d'aménagement.
- 4) Description des travaux hydrauliques particuliers : mise en place de communications, surcreusements, pose d'ouvrages de contrôle des eaux...
- 5) Description des formations végétales : reconstitution des conditions stationnelles favorables, techniques de végétalisation, entretiens recommandés...
- 6) Description des équipements destinés à l'accueil du public.
- 7) Estimation financière de chacune des opérations à réaliser (travaux préliminaires, terrassements, travail du sol, travaux hydrauliques...).

La réalisation d'un tel APD permettra d'une part une organisation rationnelle des travaux réalisés par l'entreprise elle-même, d'autre part pour les opérations sous-traitées la réalisation de cahiers des charges.

4.2. Organiser le chantier

L'organisation du chantier est un point important, particulièrement dans le cas d'un aménagement écologique. Il concerne le site lui-même ainsi que la protection de ses abords.

Le phasage du chantier

Il est important de prévoir les périodes d'intervention, d'organiser les phases de chantier en particulier dans un souci de coordination des diverses équipes. Ceci doit être fait :

- 1) en adéquation avec le respect de la vie animale et végétale : éviter de perturber les oiseaux nicheurs⁽¹⁹⁾, ne pas provoquer des modifications des niveaux d'eau mettant en péril certains habitats...
- 2) en adéquation avec les contraintes techniques : progression de l'exploitation du gisement, saisons optimales d'intervention (pour la végétalisation par exemple)...

Une certaine souplesse est cependant préférable car des éléments extérieurs peuvent retarder le chantier. Le cas classique est celui d'une météo trop pluvieuse empêchant les travaux de terrassement et pouvant parfois obliger à repousser les travaux de végétalisation de 6 mois à 1 an.

L'information du personnel

Afin que les travaux particuliers qu'exigent souvent les chantiers d'ingénierie écologique et les mesures de protection ne soient pas regardées comme d'inutiles contraintes, il est souhaitable que le personnel travaillant sur la carrière soit informé. Connaissant ainsi la justification de ces mesures, il sera certainement plus enclin à les mettre en œuvre.

Le balisage et le piquetage des sites avant travaux

Les zones concernées par le chantier d'aménagement écologique doivent être convenablement piquetées.

Les secteurs internes ou périphériques à respecter doivent absolument être balisés avant le commencement des travaux. Cette mesure est indispensable afin d'éviter toute fausse manœuvre qui entraînerait une dégradation irréversible de ces habitats.

La disposition des merlons

Les merlons de terre souvent disposés en bordure d'exploitation, ne doivent jamais empiéter sur les sites préservés ; en bordure des zones boisées, on veillera à ce qu'ils n'étouffent jamais les arbres au collet, ce qui risque d'entraîner un dépérissement de l'arbre. En revanche, placés entre la carrière et les sites, les merlons pourront aider à les préserver des effets du chantier.

Photo 19. Les merlons de terre végétale ne doivent pas être déposés trop près des lisières où ils risquent d'étouffer les arbres au collet (partie basse du tronc) et de les faire dépérir (Écosphère – Ph. Dasnias).



Quelques conseils pour les travaux

D'une manière générale, on a toujours intérêt à circuler le moins possible sur les terres remises en place. Pour ce faire, une organisation des zones de chantier est indispensable de façon à ce que les engins (bulldozers, dumpers) n'aient pas à repasser sur des zones déjà régalées. Par ailleurs, il est souvent utile de procéder en deux étapes :

- 1) Réalisation des travaux de terrassement dans leurs grandes lignes, lors de la remise en état coordonnée à l'exploitation ;
- 2) Puis soit par phases d'aménagement, soit au final, affinage à la pelle mécanique pour les secteurs nécessitant un modelé de détail : fossés, mares, buttons.

Photo 20. Berge avec talutage sommaire donnant une pente forte de l'ordre de 45° (1:1) (Écosphère – Ph. Dasnias).



Photo 21. Talutage classique dans les remises en état actuelles : pente modérée et régalage de terre végétale jusqu'au plan d'eau. On reconnaît trois ceintures de végétation : des algues filamenteuses dont le développement est dû aux apports nutritifs excessifs de la terre végétale, une petite ceinture de végétation hygrophile (ici des joncs) dans la frange de battement de la nappe, puis une friche banale de sol frais et riche sur la plus grande partie de la berge (on reconnaît au premier plan la grande consoude = *Symphytum officinale*) (Écosphère – Ph. Dasnias).



Photo 22. Berge très douce permettant de maximiser les surfaces situées dans la frange de battement de la nappe. (Écosphère – Ph. Dasnias).



TABLEAU VIII. – Correspondance entre les différents systèmes de mesure des pentes de talus.

En angle (en °)	En ratio* (hauteur : longueur)	En %	Remarques
PENTES VERTICALES A SUBVERTICALES			
90°	–	–	Pente totalement verticale
71,6°	1:3	300 %	Pentes de fronts de taille
63,4°	1:2	200 %	
PENTES FORTES			
45,0°	1:1	100 %	Pente d'équilibre des cailloux
42,0°		90 %	
38,7°		80 %	
36,9°	4:3	75 %	
35,0°		70 %	
PENTES MOYENNES			
33,4°	3:2	66 %	Pente d'équilibre des remblais de granulométrie équilibrée (sables + limons + argiles) pente maximale pour un maintien de la terre végétale régaliée sans dispositif spécial
31,0°		60 %	Limite d'utilisation d'un engin de chantier travaillant dans le sens de la pente (sol sec)
26,6°	2:1	50 %	Pente d'équilibre des remblais très argileux ou très sableux.
21,8°	2,5:1 ou 5:2	40 %	Pente maximale pour des argiles disposées sur une membrane plastique
18,3°	3:1	33 %	Inclinaison maximale pour une rampe d'accès des camions ou véhicules sans équipements spéciaux (sol sec)
16,7°		30 %	Limite d'utilisation d'un engin travaillant perpendiculairement à la pente
PENTES FAIBLES			
14,0°	4:1	25 %	
11,3°	5:1	20 %	
8,5°		15 %	
5,7°	10:1	10 %	
PENTES TRÈS FAIBLES			
2,9°	20:1	5 %	
0,6°	100:1	1 %	Pente minimale pour assurer un drainage superficiel des sols

* selon les documents et les personnes, l'usage varie : pour certains une pente de 33 % est dite de 3 pour 1 (3:1) pour d'autres de 1 pour 3 (1:3). En génie civil, l'usage serait cependant d'employer longueur : hauteur. Enfin, au lieu de 1:3, on peut aussi écrire 1/3.

sensibles à l'érosion. L'expérience a montré qu'on ne devait pas hésiter à réaliser des pentes de 10:1 voire 15:1. Pour réaliser certains types de marais ou de prairies humides, on peut aller jusqu'à des pentes de 50:1 à 100 : 1, à savoir des surfaces sub-horizontales assurant un léger drainage sans risquer d'assèchement des sols.

Trop fréquemment l'observation des sites remis en état montre un profil de la berge convexe, tendant à présenter la plus forte pente à hauteur de la frange de battement de la nappe. Les berges réalisées avec une forme concave se révèlent plus efficaces et plus résistantes à l'érosion.

Fig. 50. – Un profil concave maximise la superficie de zone humide et se révèle plus résistant à l'érosion.

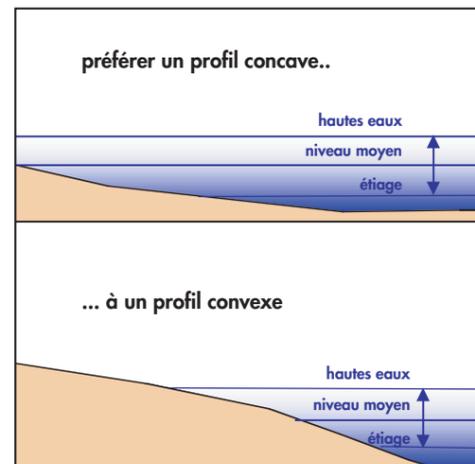


Photo 23. Exemple de talutage convexe (Écosphère – M. Pajard).



Photo 24. Grâce à un talutage concave, les zones plates se trouvent à fleur d'eau (Écosphère – M. Pajard).

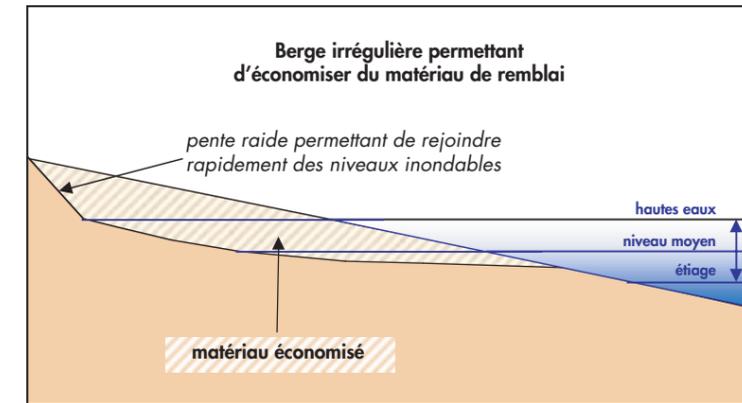


Fig. 51. – Il n'y a pas d'obligation à réaliser des pentes régulières ; au contraire une pente raide au départ puis presque plane ensuite permet d'augmenter la superficie de zone humide et d'économiser du matériau.

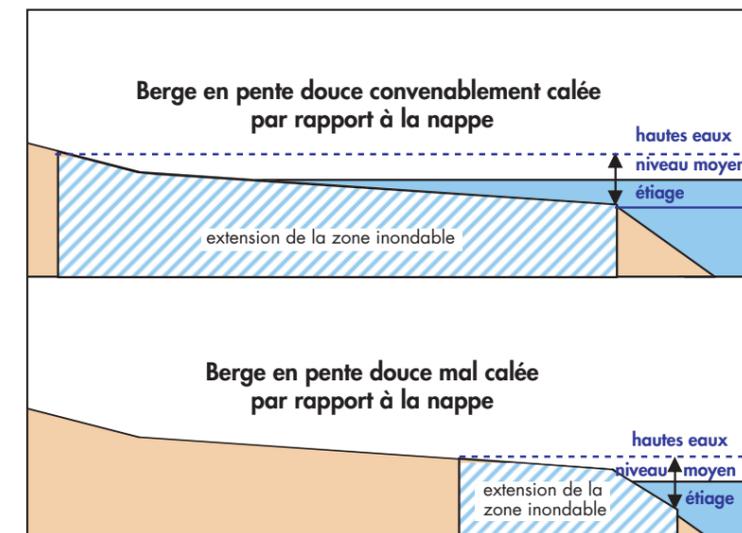


Fig. 52. – Le calage des terrains par rapport à la nappe est une des clés de la réussite des aménagements.



Photo 25. Exemple de talutage convexe et irrégulier (Écosphère – M. Pajard).

Une économie de matériaux peut être réalisée facilement avec comme résultat la création de pentes diverses. Au lieu de lisser la pente pour qu'elle soit régulière sur tout son profil, on crée d'abord un talus puis une surface concave en pente douce.

4.3.2. CALER LES BERGES PAR RAPPORT AU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE

Les zones humides sont définies en premier lieu par leur position limite entre le milieu terrestre et le milieu aquatique. Il va donc de soi que si l'on veut, dans un aménagement écologique, maximiser les surfaces de zones humides, il faudra maximiser les contacts terre / eau. Ceci suppose :

- 1) de caler convenablement les berges par rapport au niveau piézométrique moyen ;
- 2) de réaliser des pentes aussi faibles que possible dans la zone de battement de la nappe.

Les niveaux piézométriques donnés par l'expertise hydrogéologique sont indispensables et permettent d'évaluer le niveau moyen des eaux du futur plan d'eau. Cependant, de nombreuses expériences ont montré que l'exploitation même de la gravière ainsi que la présence de plans d'eau modifiaient les propriétés de l'aquifère dans des proportions qui ne sont pas toujours prévisibles par les spécialistes. Par ailleurs, la perméabilité du fond de fouille n'est pas toujours aisée à prévoir et l'exploitation peut atteindre des couches plus ou moins perméables (calcaires karstiques, sables...). Enfin, des événements extérieurs au site peuvent intervenir : nouveau captage d'eau potable, accentuation des pompages agricoles, ouverture d'autres gravières... Il est donc fortement conseillé de procéder de la façon suivante :

- 1) réaliser l'essentiel des travaux sur la base des niveaux piézométriques annoncés par les expertises ;
- 2) laisser passer un an (ou plus si le phasage de l'exploitation s'y prête) en observant les variations du plan d'eau (attention cependant à vérifier auprès des experts si l'on est dans une année de hautes eaux, d'eaux moyennes ou de basses eaux) ;
- 3) procéder à des travaux de reprofilage et de finition tenant compte des observations in situ.

4.3.3. RECHERCHER LES IRRÉGULARITÉS

Les techniques d'ingénierie écologique peuvent être innovantes par rapport aux techniques classiques. C'est ainsi que pour le profilage de la berge, on recherchera au maximum les irrégularités et ce dans le souci, constant en écologie, de diversification des conditions de milieu.

Irrégularités verticales du substrat

En ce qui concerne le calage des berges par rapport au niveau moyen du plan d'eau, les certitudes ne sont jamais acquises. Aussi aura-t-on intérêt à tabler sur une fourchette plutôt que sur une valeur précise. En augmentant les irrégularités du substrat, on multipliera les conditions d'humidité. Une technique permettant d'organiser rationnellement les irrégularités est celle du substrat en « *tôle ondulée* », où les creux et les bosses alternent perpendiculairement à la pente.

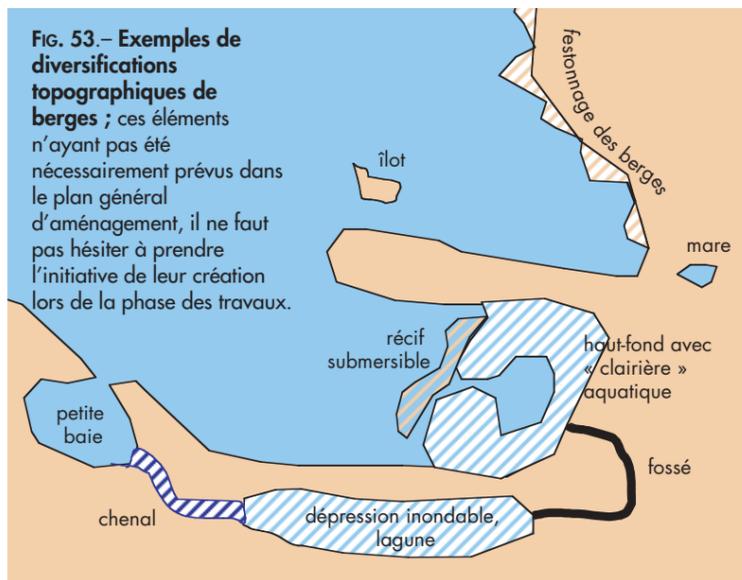
Diversification topographique de la zone des berges

La conception générale de l'aménagement ne peut prévoir le contour ni le profilage des berges dans le détail. Aussi, ne faudra-t-il pas hésiter à créer autant que possible de micro-irrégularités au niveau des berges et de leurs alentours : baies, sinuosités, dépressions, chenaux, îlots, mares...

Photo 26. Une alternance de sillons en creux et en bosses (« *tôle ondulée* ») permet de créer des micro-irrégularités topographiques et de ménager différentes profondeurs d'inondation (Photographies Écosphère – M. Pajard).



FIG. 53. – Exemples de diversifications topographiques de berges ; ces éléments n'ayant pas été nécessairement prévus dans le plan général d'aménagement, il ne faut pas hésiter à prendre l'initiative de leur création lors de la phase des travaux.



Photos 27-28. Diversification topographique des berges : la réalisation d'un réseau de chenaux permet de créer une mosaïque de petits secteurs diversement inondés ou exondés selon les saisons.



Photo 29. Diversification topographique des berges : réalisation d'une lagune en eau peu profonde à l'arrière de la berge.



Photo 30. Diversification topographique des berges : aménagement d'une petite anse.



Photo 31. Diversification topographique des berges : hauts-fonds et îlots.



PLANCHES V. et VI. (M. Courcoux). Ces deux dessins montrent la même berge en période de hautes eaux et à l'étiage. Le calage du niveau des berges par rapport aux variations du niveau de la nappe et du plan d'eau est une des clefs de la réussite d'un aménagement de zone humide sur une carrière.





PLANCHE VII. (M. Courcoux).— Cette berge, représentée en période de moyennes eaux, montre des diversifications topographiques réalisées dans le détail à l'occasion des travaux d'aménagement : hauts-fonds irréguliers immergés sous des lames d'eau différentes, petite anse à gauche et, au premier plan, maintien d'une zone plus élevée qui n'est inondée qu'au moment des plus hautes eaux.

Photo 32a (Écosphère – M. Pajard) **et 32b** (G. Arnal). Exemples de berges érodées. En bas, l'érosion a entraîné la terre végétale dans le plan d'eau.



4.3.4. LA PROTECTION CONTRE L'ÉROSION

La principale cause de l'érosion est due à la houle qui se forme sous l'effet du vent (ou d'embarcations à moteur). Ces vagues se déplaçant horizontalement sur le plan d'eau viennent frapper les berges y entraînant un phénomène dit de *batillage*.

L'énergie des vagues dépend de leur longueur et de leur hauteur. La figure 54 illustre de façon simplifiée l'intérêt des pentes faibles vis-à-vis de l'érosion :

- dans le cas d'une pente douce, les vagues dissipent l'essentiel de leur énergie en se répandant sur la berge ; l'énergie érosive, qui attaque la berge est faible ;
- inversement, dans le cas d'une berge en pente raide, l'énergie cinétique⁽²⁰⁾ de la houle se transforme pour une bonne partie en énergie physique venant frapper la berge et l'éroder.

D'autres paramètres interviennent, en particulier le substrat dont est constituée la berge ou différentes caractéristiques des eaux : turbidité, pH, température, charge minérale...

Les techniques végétales de lutte contre l'érosion et de stabilisation des berges

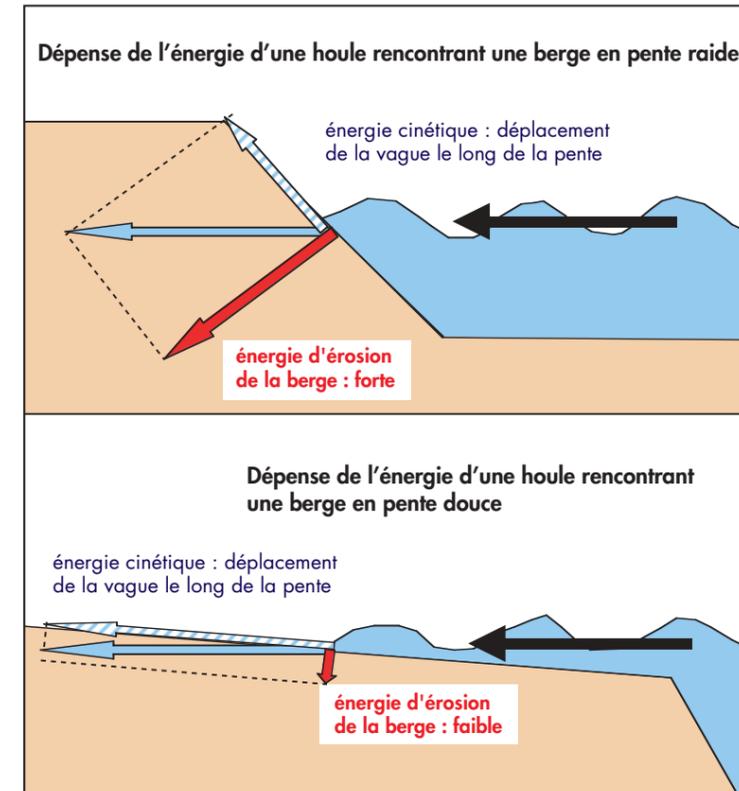
Il existe différentes techniques permettant de protéger les berges contre l'érosion et le batillage. Pour un site à vocation naturelle, on recommandera plutôt les techniques végétales que les techniques de pur génie civil. Quelques techniques sont présentées ici, qui peuvent bien entendu être combinées entre elles.

⇒ La banquette végétalisée

La présence quelque peu en avant de la berge, au niveau d'une banquette, de plantes aquatiques ou semi-aquatiques absorbe une partie de l'énergie érosive.

⁽²⁰⁾ L'énergie cinétique est celle qui se traduit par le déplacement de la vague.

Fig. 54.— Lorsqu'une vague rencontre une berge, son énergie ne se dissipe pas de la même manière selon qu'elle heurte une pente raide ou qu'elle prolonge son mouvement le long d'une pente faible. Dans le premier cas, une grande partie de l'énergie (flèche bleue) se transforme en énergie mécanique (flèche rouge) qui érode la berge. Dans le second cas, la plus grande partie de l'énergie est dépensée dans l'étalement de la vague sur la berge (flèche rayée de bleu).



En ce qui concerne les hydrophytes, les Nymphéacées à grandes feuilles flottantes sont efficaces dans l'absorption de la houle : nénuphar blanc (*Nymphaea alba*) et nénuphar jaune (*Nuphar lutea*). Pour les végétaux semi-aquatiques, on se reportera aux espèces recommandées pour la tenue des berges inondées en permanence (voir tableau IX). Ajoutons également certains saules supportant bien le batillage comme le saule osier (*Salix viminalis*) ou le saule blanc (*Salix alba*).

⇒ La végétalisation de la berge

La plus simple des techniques végétales consiste simplement à végétaliser la berge par semis et/ ou plantation (et même avec des boutures). Dans toutes les autres techniques, il y a aussi végétalisation, mais accompagnée de dispositifs complémentaires. En conséquence, la liste d'espèces donnée dans le tableau IX, est valable pour toutes les techniques, y compris l'habillage de dispositifs de génie civil.

Photo 33. Banquette végétalisée avec des joncs, des iris, des saules... (Écosphère – M. Pajard).

Fig. 55.— Protection contre le batillage : banquette végétalisée.

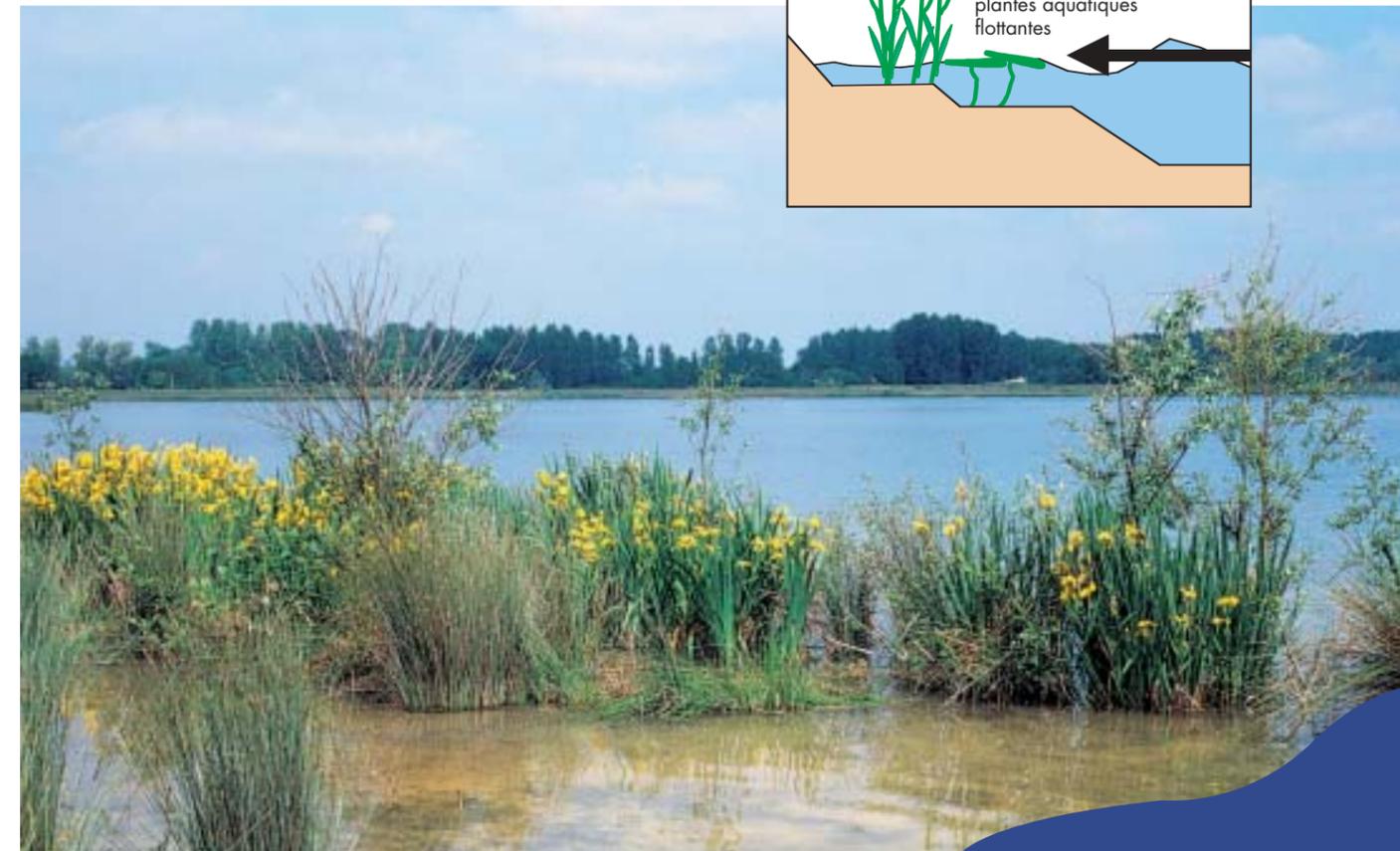
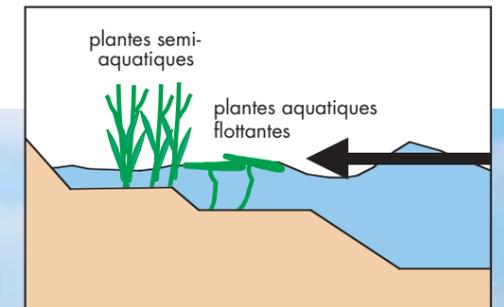


TABLEAU IX. – Sélection d'espèces recommandées pour la tenue des berges.

Critères de sélection : développement du système racinaire, rapidité de croissance, faibles exigences écologiques, disponibilité commerciale.

		Sols inondés en permanence	Sols exondés en été
<i>Achillea ptarmica</i>	Achillée sternutatoire		+
<i>Butomus umbellatus</i>	Butome en ombelles	+	
<i>Calamagrostis epigejos</i>	Calamagrostis commun		+
<i>Carex acutiformis</i>	Laïche des marais	+	+
<i>Carex elata</i>	Laïche raide	+	+
<i>Carex paniculata</i>	Laïche paniculée	+	+
<i>Carex pseudocyperus</i>	Laïche faux-souchet	+	+
<i>Carex riparia</i>	Laïche des rivages	+	+
<i>Eleocharis palustris</i>	Scirpe des marais	+	+
<i>Eupatorium cannabinum</i>	Eupatoire chanvrine	+	+
<i>Filipendula ulmaria</i>	Reine des prés		+
<i>Glyceria maxima</i>	Glycérie aquatique	+	
<i>Juncus conglomeratus</i>	Jonc aggloméré		+
<i>Juncus effusus</i>	Jonc épars		+
<i>Juncus inflexus</i>	Jonc glauque		+
<i>Lysimachia vulgaris</i>	Lysimaque commune	+	+
<i>Lythrum salicaria</i>	Salicaire	+	+
<i>Mentha aquatica</i>	Menthe aquatique	+	+
<i>Myosotis scorpioides</i>	Myosotis des marais	+	+
<i>Phalaris arundinacea</i>	Baldingère	+	+
<i>Phragmites australis</i>	Roseau commun	+	+
<i>Rumex hydrolapathum</i>	Patience des eaux	+	
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	Sagittaire	+	
<i>Schoenoplectus lacustris</i>	Jonc des chaisiers	+	
<i>Sparganium erectum</i>	Rubanier rameux	+	
<i>Typha angustifolia</i>	Massette à feuilles étroites	+	
<i>Typha latifolia</i>	Massette à feuilles larges	+	
<i>Valeriana officinalis</i>	Valériane officinale		+

NB : un certain nombre de ces espèces sont rares et même protégées dans certaines régions ; afin d'éviter les problèmes de pollution génétique, on s'abstiendra de les utiliser.



Photo 34. Berges stabilisées à l'aide de nappes préensemencées de roseaux. Écosphère – M. Pajard

⇒ Les nappes préensemencées ou précultivées

L'utilisation de géotextiles biodégradables ou des nappes tridimensionnelles, quoique encore expérimentale, est en train de se développer. Ces nappes sont soit préensemencées (elles contiennent des graines), soit précultivées (elles sont déjà couvertes de jeunes plantes) en espèces convenant à la tenue des berges. Il faut alors ancrer la nappe à la berge. Les nappes sont biodégradables : dans un premier temps, elles protègent les jeunes plants du batillage, puis en se dégradant se transforment en compost concourant à la bonne croissance des végétaux.

⇒ Les gabions végétalisés

Le gabion végétalisé combine une technique de génie civil avec une technique de génie écologique. En génie civil, un gabion est un dispositif tressé ou grillagé, cylindrique ou parallélépipédique, courant le long de la berge et contenant des matériaux divers (terres, cailloux, pierres). Il s'agit d'une sorte d'enrochement contenu par une grille. Si le gabion contient de la terre et des végétaux (semences, rhizomes...), on l'appellera un gabion végétalisé. Les matériaux peuvent être contenus dans une armature en géotextile, une géogrille ou un simple grillage. Il est conseillé de disposer des pieux en bois pour arrimer le dispositif.

⇒ **Le fascinage** consiste en une double rangée de pieux parallèle à la rive ; l'espace entre les pieux est comblé de petits fagots de bois de saules (saule osier = *Salix viminalis*, en général), liés entre eux (fascines). Le dispositif peut être installé à quelques mètres de la berge et

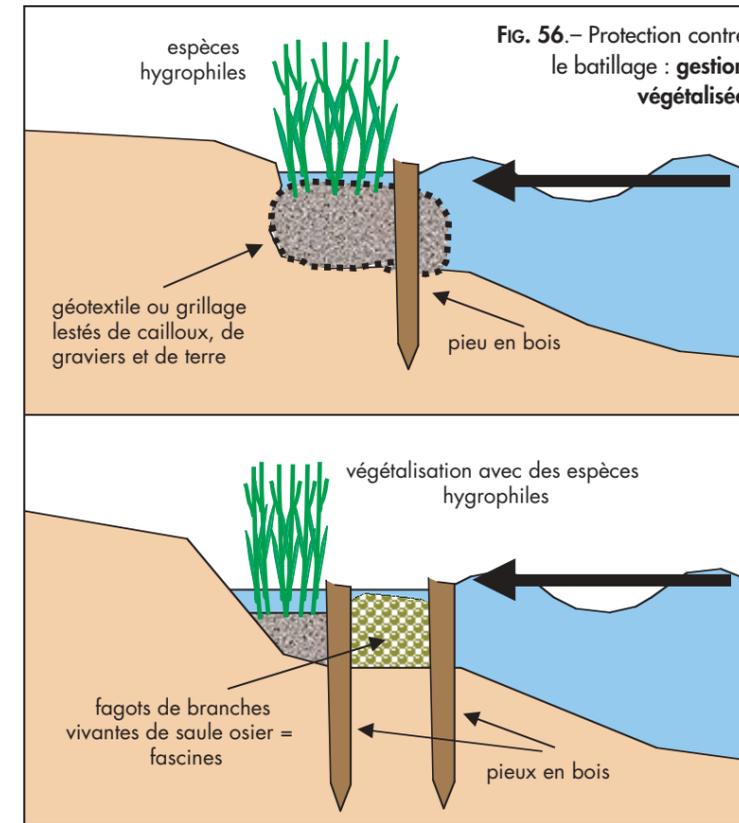


Fig. 57. – Protection contre le batillage : fascinage et végétalisation.

servir de brise-lames (la profondeur ne doit pas dépasser 1 m à 1,5 m) ou directement au pied de la berge. Les fascines étant faites de bois vivant, celui-ci va rejeter et s'enraciner. Le fascinage se transforme alors progressivement en ligne de saules. Sinon, la longévité de ce type de dispositif ne dépasse pas 10 ans. Dans tous les cas, la réalisation de plantations entre le système et la berge est conseillée.

⇒ **Le tressage et le clayonnage** consistent à tresser des branches de saules vivants (saule osier = *Salix viminalis*, en général) en les

Photo 36. Réalisation d'un enrochement pour protéger un îlot contre le batillage sous les vents dominants. Les éléments sont des ouvrages de béton non utilisés sur un chantier qui ont été recyclés dans cet aménagement (Écosphère – M. Pajard).



Photo 35. Tressage. L'espace entre le dispositif et la berge sera remblayé et végétalisé pour constituer une bande de zone humide (Écosphère – P. Boudier).

enlaçant le long d'une rangée de pieux, enfoncés au pied de la berge. Dans le cas du tressage on forme une sorte de rempart en pied de berge, le creux formé entre le tressage et la berge est remblayé et peut-être planté. Dans le cas du clayonnage, le dispositif est plaqué contre la berge. Là encore, les branches de saules sont vivantes et peuvent rejeter et s'enraciner.

Les techniques de génie civil

L'enrochement est un moyen classique de protéger des berges vulnérables contre l'érosion. Des éléments inutilisés provenant de chantiers de travaux publics peuvent être recyclés à cet usage, pourvu qu'ils soient inertes. Compte tenu de l'aspect esthétique parfois douteux et pour renforcer l'efficacité, on aura tout intérêt à associer les enrochements avec une végétalisation : on peut par exemple prévoir des replats remblayés de terre ou incorporer des dispositifs du type gabions végétalisés (voir plus haut).

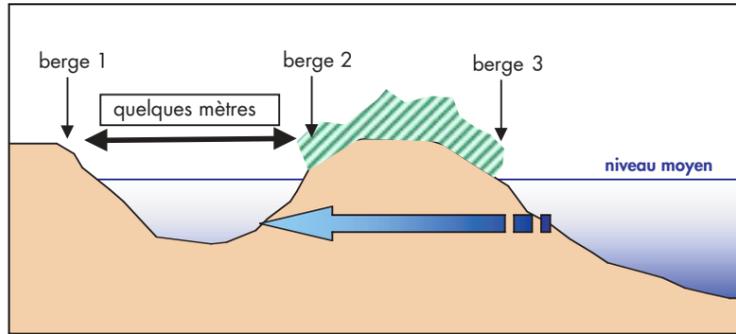


FIG. 58. – Le principe de la triple-berge. La flèche bleue montre la communication entre le fossé et le plan d'eau par l'intermédiaire de la nappe. Cependant, si les matériaux sont peu perméables, cette communication se fait avec un délai.



Photo 37.

Aménagement de triples berges ouvertes sur le plan d'eau (CNC - J.-L. Michelot).

Le tunage ressemble au tressage mais avec utilisation de branchages morts, la reprise des saules étant ainsi évitée. On forme ainsi une sorte de palissade en bois, derrière laquelle on peut remblayer et végétaliser.

Les protections de berges du type « palplanches » peu esthétiques et entraînant une coupure quasi complète entre le milieu aquatique et le milieu terrestre sont déconseillées dans le cas d'un aménagement écologique.

4.3.5. LES TYPES DE BERGES PARTICULIERS

La triple berge

La technique dite de la « triple-berge » (ou « double-berge » selon les auteurs) est simple et peu coûteuse à mettre en œuvre. Elle a été expé-

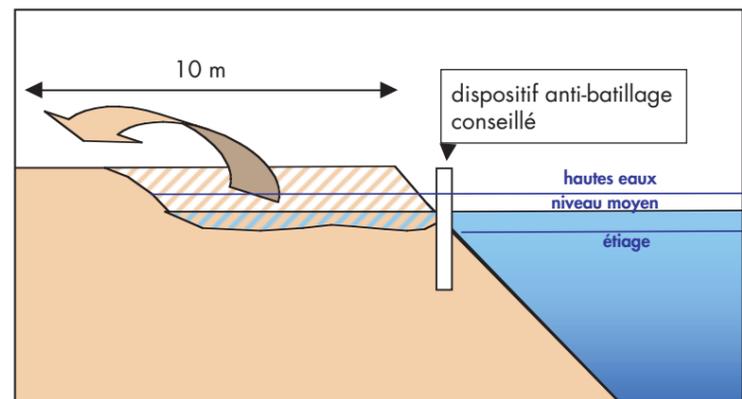


FIG. 59. – Le principe de la berge raide retaillée en arrière.

rimentée avec succès dans des sites comme l'Écopole du Forez ou Miribel-Jonage. En arrière d'une berge déjà stabilisée par la végétation, on creuse un fossé parallèle à la berge. Le chenal ainsi créé sous le niveau du plan d'eau se mettra spontanément en eau si les matériaux ne sont pas imperméables. Dans le cas contraire, on pourra alimenter le chenal en ouvrant ponctuellement la digue. La « triple berge » a différents avantages :

- 1) création d'une zone humide à l'abri des problèmes d'érosion ;
- 2) lorsque le plan d'eau ne déborde pas dans le fossé en période de hautes eaux, création d'une zone humide isolée du peuplement de poissons du plan d'eau et donc favorable aux batraciens et aux insectes à larves aquatiques (Odonates en particulier) ;
- 3) contrôle de la végétalisation facilité par emprisonnement des propagules à l'arrière des berges ;
- 4) le cas échéant, lorsque le chenal est hydriquement isolé, niveau des eaux pouvant être contrôlé par des systèmes de retenue et de vidange ;
- 5) entretien par curage régulier aisé à réaliser.
- 6) enfin, il s'agit d'une technique que l'on peut mettre en œuvre sur des gravières déjà existantes, en particulier lorsque les berges du plan d'eau sont trop raides pour que se développent les végétaux aquatiques (il faut dans ce cas disposer du recul suffisant).⁽²¹⁾

La berge retaillée

La technique de la berge retaillée s'impose lorsque le plan d'eau est trop profond pour qu'on puisse créer des berges en remblais. On trouve notamment ce type de situation dans les gravières très profondes de la vallée du Rhin ou dans des carrières de roches massives.

La berge en gradins

Une technique assez peu mise en œuvre est celle des séries de gradins, séparés par des talus plus raides (± pente d'équilibre des matériaux). L'avantage est de s'assurer des zones plates situées à différentes hauteurs et qui se trouveront donc sous différents niveaux d'eau selon la hauteur du plan d'eau. Cette technique est particulièrement recommandée :

⁽²¹⁾ Au cas où les travaux ont lieu dans la bande de protection de 10 m, il faut démontrer l'innocuité sur la stabilité des terrains pour obtenir une dérogation auprès des administrations compétentes.

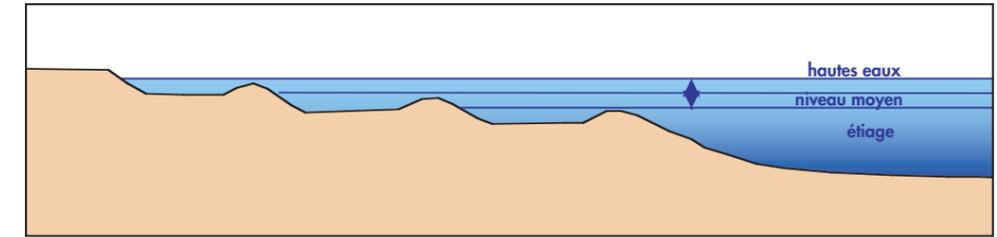


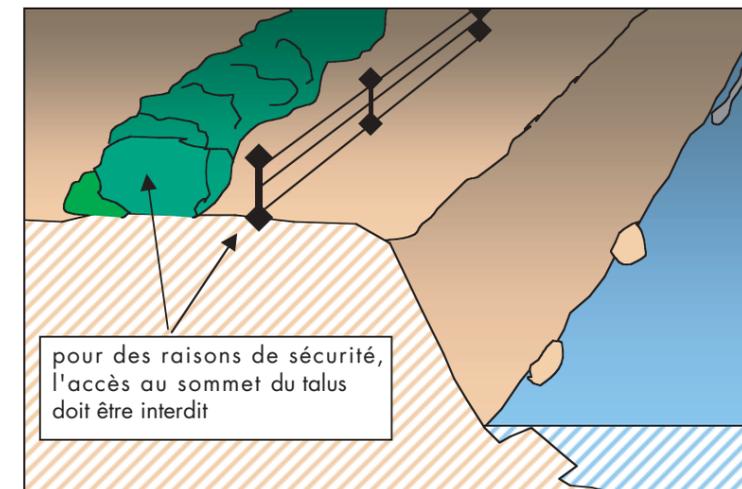
FIG. 60. – Principe de la berge en gradins qui permet de disposer de berges planes à différents niveaux d'inondation.

- 1) lorsqu'on ignore le niveau précis du futur plan d'eau ;
- 2) pour constituer des zones humides temporaires, milieux de grand intérêt écologique.

La berge à banquette ondulée

Lorsqu'il est difficile de réaliser des pentes douces perpendiculairement à la berge - soit parce que l'on manque de recul, soit parce que l'on manque de matériaux -, on pourra les réaliser parallèlement à la rive. On réalise alors une banquette qui au lieu d'être plate fait alterner une série de bosses et de creux.

FIG. 61. – Des berges escarpées, convenablement sécurisées, constituent un type de berge présentant un intérêt écologique.



Cette solution peut être adaptée aux carrières de roches massives, en retaillant la partie supérieure du front de taille située au niveau du plan d'eau.

La berge escarpée

Plusieurs espèces se reproduisent dans les fronts de taille meubles (mais solides) et autres talus minéraux : Hironnelle de rivage, Martin-pêcheur, Guêpier d'Europe... et divers Hyménoptères peu répandus : guêpes et abeilles fouisseuses, guêpes maçonnées... Les berges escarpées sont donc un atout supplémentaire dans le cadre d'un aménagement écologique.

Cependant, compte tenu du danger qu'elles peuvent présenter pour le public, il faut prendre des mesures de sécurité. On peut citer les solutions suivantes :

- 1) disposer une haie dense, épineuse de préférence en haut de la berge ;
- 2) clôturer la zone d'accès à la berge et poser des panneaux signalant le danger ;
- 3) créer les berges escarpées dans des îles.

Photo 38. Sur ce site où de nombreux hauts-fonds ont été aménagés, on a laissé un front de taille abrupt où nichent des Hironnelles de rivage (*Riparia riparia*) (Écosphère - V. Leloup).



Solutions à quelques problèmes classiques

Trop peu de remblais

1. réserver les remblais à quelques zones privilégiées plutôt que de les éparpiller sur l'ensemble du site.
2. déblayer des berges dans la bande des 10 m (ce qui demande une dérogation, qui peut être obtenue si la stabilité des terrains alentours n'est pas menacée).

Un niveau piézométrique incertain

1. prévoir des berges en pente douce à différents niveaux piézométriques.
2. réaliser des berges en gradins.
3. attendre une année et réintervenir après stabilisation du niveau du plan d'eau.

Un battillage trop important entraînant l'érosion des berges

1. reprofiler la berge en pente plus douce.
2. implanter des végétaux aquatiques (type nénuphar) ou des héliophytes (roseaux, joncs, carex...)
3. installer des haies brise-vent.
4. mettre en place des systèmes anti-érosion (voir chapitre spécial).

4.4. L'utilisation des substrats disponibles et la reconstitution des sols

Un sol est une structure complexe qui se développe en fonction de la roche sous-jacente (= roche-mère), des phénomènes physiques (climat, érosion...) et de la végétation. Les sols déterminent par leurs propriétés physiques et chimiques les caractéristiques principales des biotopes. C'est pourquoi, le décapage, le stockage, la mise en œuvre des sols sont des opérations qui doivent être effectuées avec la plus grande attention.

4.4.1. CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPALES CATÉGORIES DE SUBSTRATS DES GRAVIÈRES

A titre indicatif, une terre végétale classique de sol alluvial est composée en moyenne de 55 % de particules minérales solides (argiles, limons, sables), de 25 % d'eau, de 15 % de gaz et de 5 % de matières organiques. On notera donc que l'eau et l'air constituent 40 % de la terre végétale, ce qui explique qu'elle change de structure lorsqu'elle est tassée.

Plus généralement, on a affaire à quatre principales catégories de substrats, selon la granulométrie.

- 1) **des sols légers**, à dominante sableuse, perméables, vite drainés et rapides à se réchauffer ;

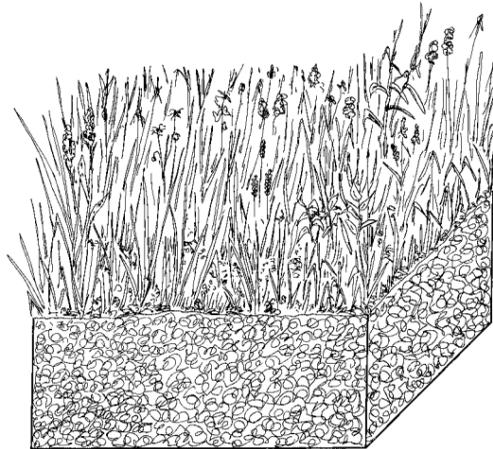


FIG. 65. – Le sol franc et équilibré est le plus fertile ; il présente un mélange des textures sableuse, limoneuse et argileuse qui avec l'humus s'associent en agrégats.

EXEMPLES DE SOLS CONTRAIGNANTS

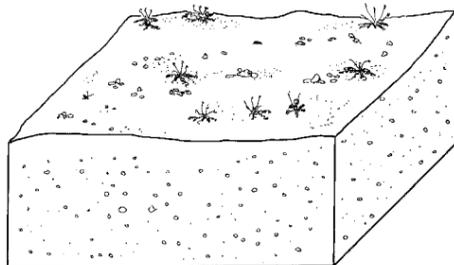


FIG. 62. – Le sol sablo-caillouteux, un sol perméable et peu productif.

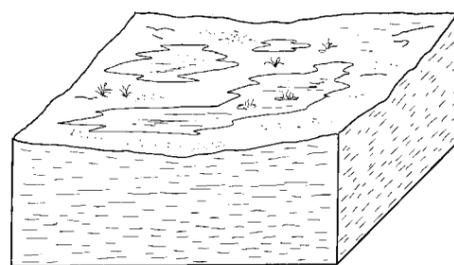


FIG. 63. – Le sol très limoneux devient brusquement imperméable après une forte pluie = phénomène de battance

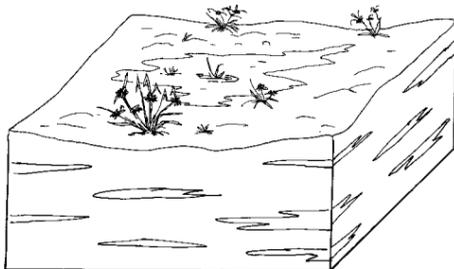


FIG. 64. – Le sol argileux peut être assez productif mais il se rétracte rapidement en cas de sécheresse et se fendille alors de manière caractéristique.

L'importance des sols pour les végétaux

Rappelons les caractéristiques principales des substrats ayant un effet direct sur la végétation et par suite sur l'écosystème dans son ensemble :

La circulation de l'eau et la capacité de rétention, qui sont déterminées par la taille des particules (granulométrie) et leur manière de s'organiser (structure) ;

La capacité d'échange, c'est-à-dire la plus ou moins grande mobilité dans le sol des minéraux à charge positive comme le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}), le sodium (Na^+)... ou négative comme les sulfates (SO_4^{2-}), chlorures (Cl^-), nitrates (NO_3^-)... elle dépend de la présence d'agrégats qui se forment généralement avec l'argile et l'humus ;

Le pH, c'est-à-dire si un sol est acide, neutre, basique ; les sols riches en calcium sont basiques ; les sols riches en silice sont acides ;

les conditions d'oxydoréduction, qui dans un sol humide dépendent de l'engorgement ; elles déterminent le comportement d'éléments essentiels comme le fer ou l'azote ; par exemple, dans un sol bien drainé, le fer est insoluble, mais en cas d'engorgement prolongé il se solubilise et migre vers le bas ; tout ceci a des effets sur le fonctionnement biologique des racines et des micro-organismes du sol.

ils sont pauvres en minéraux échangeables (à l'exception de la silice dissoute) et souvent aussi en matières organiques ; ce sont des sols peu fertiles, qui ont souvent un grand intérêt floristique.

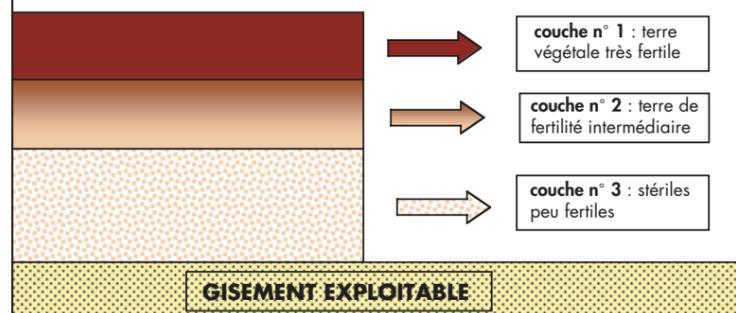
- 2) **des sols battants**, à dominante limoneuse, qui présentent un mauvais drainage après la pluie (formation d'une croûte de battance) et une assez mauvaise rétention de matières organiques ; le sol très limoneux n'est pas un sol facile pour les végétaux ;

- 3) **des sols lourds**, à dominante argileuse qui contiennent beaucoup d'eau, dont seule une partie est disponible, l'autre étant très fortement liée aux molécules d'argiles ; le drainage est faible et l'engorgement survient rapidement ; ces substrats se réchauffent lentement mais lorsqu'ils s'assèchent, la rupture hydrique est brutale pour les végétaux (on connaît le fendillement caractéristique des sols argileux secs) ; en général, ces sols ont une bonne capacité à retenir les nutriments.

- 4) **des sols équilibrés**, constitués d'un mélange en proportions diverses mais assez équilibré de sables, de limons et d'argiles ; en conditions normales, il se forme alors une structure en agrégats qui assurent une bonne circulation de l'eau sans drainage excessif ni dessèchement brusque, tandis que les minéraux et la matière organique sont retenus tout en restant disponibles pour les végétaux ; ces sols, à structure grumeleuse caractéristique, sont les plus productifs.

Cependant, bien d'autres types de sols peuvent être rencontrés sur carrières : les lithosols, qui sont des sols rocheux durs (dalles sur carrières de roches massives en particulier), les régosols (éboulis, sables purs), les sols tourbeux...

FIG. 66. – Le décapage en trois couches, une méthode expérimentée en Grande-Bretagne, à envisager lorsque la terre végétale est trop riche en nitrates.



4.4.2. LE DÉCAPAGE DES TERRES DE DÉCOUVERTE

Stériles et terre végétale

En général, le décapage des terres de découverte se fait en deux passes : on enlève d'abord une couche d'environ 0,5 m (0,3 m à 1 m), appelée « terre végétale », puis la couche de stériles séparant cette terre végétale du gisement exploitable. La terre végétale constitue généralement un substrat humifère assez riche en matières nutritives, ce qui permet de l'utiliser à des fins de « fertilisation » dans l'aménagement.

Le décapage en trois passes

Dans le cas d'un aménagement écologique, en particulier lorsque la couche superficielle de terre végétale est très fertile, tandis que la couche inférieure l'est nettement moins, un décapage en 3 passes permet de diversifier la nature des remblais disponibles :

- 1) une passe de 0 à 30-50 cm de profondeur = *couche superficielle*
- 2) une deuxième passe de 30-50 à 60-90 cm = *couche sous-jacente*
- 3) la dernière passe pour les stériles.

L'avantage est de disposer entre la couche superficielle riche en matières organiques et en nitrates et les stériles peu productifs, d'une terre de fertilité intermédiaire, ce qui permet d'affiner la végétalisation, lors de l'aménagement.

Les décapages sélectifs

Rappelons que suite aux données fournies par la reconnaissance du gisement (campagne de sondages) ou à l'occasion même des travaux, des substrats particuliers ont pu être décelés : sables siliceux ou silico-calcaires, lentilles d'argiles, substrats tourbeux ou paratourbeux, etc. Les décapages sélectifs concernant ces substrats sur une ou plusieurs couches doivent être organisés : piquetage, engins utilisés, stockages intermédiaires...

4.4.3. LE FOISONNEMENT

Un volume donné de déblai ne donne pas le même volume de remblai. L'excédent dû au foisonnement varie selon la nature des terres (ainsi que du taux d'humidité lors des travaux et de la technique de mise en place). Globalement, les taux de foisonnement sont donnés par le tableau X. A noter cependant, qu'avec le temps, les conséquences du foisonnement ont tendance à s'atténuer, les substrats se tassant sous l'effet des éléments climatiques (précipitations, gel...) et éventuellement du piétinement ou du passage d'engins.

TABLEAU X. – Taux de foisonnement des divers type de matériaux

Sables	0 %
Terres végétales	15 à 20 %
Terrains argileux (ex : marnes)	25 à 35 %
Argiles plastiques, glaise	35 à 70 %
Roches massives	35 à 70 %

4.4.4. LA QUESTION DE L'UTILISATION DE LA TERRE VÉGÉTALE ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS

En l'absence d'une fertilisation, très peu souhaitable pour un aménagement écologique, la terre végétale représente le substrat le plus riche dont les aménageurs disposent. S'il s'agit de terres agricoles, il s'agit même d'un substrat très enrichi en nitrates, phosphates...

Cette terre végétale doit être réservée à des usages précis et non répandue sur l'ensemble du site. En effet, si la richesse d'un sol est une qualité appréciée en agronomie ou en horticulture, elle est souvent un inconvénient en écologie. On se rappellera la règle suivante : s'il est toujours facile d'engraisser une terre, il est inversement extrêmement difficile de réduire sa fertilité. Son utilisation dépend donc des objectifs.

(22) Les Chironomes sont de petites mouches dont les larves se développent dans les vases richement nutritives et jouent un rôle important dans la nutrition des Anatidés, en particulier des canetons.

L'utilisation sur les berges et les hauts-fonds

Si le souci est d'augmenter la productivité des étangs, on pourra utiliser de la terre végétale sur les berges et les hauts-fonds pour amorcer la chaîne alimentaire :

- berges, zones peu profondes, marais : 30 cm pour créer les conditions initiales de développement ;
- zones plus profondes : 15 cm qui libéreront progressivement les nutriments pour les Chironomes⁽²²⁾ ; attention toutefois, si les apports extérieurs (nappe, ruissellement...) sont déjà chargés en nitrates ou en phosphates, comme en plaine agricole par exemple ;

La mise en place de terre végétale dans des zones devant être inondées est délicate. Si l'on travaille à sec, il faut tasser la terre. Sinon, la terre végétale doit être retenue : zone en dépression, tunage en bord de berge (voir plus haut), petite digue...

Cependant cet emploi de terre végétale dans le plan d'eau risque de favoriser les proliférations d'algues, voire pour les cas les plus sévères, les phénomènes de botulisme, à l'origine de la mort de nombreux oiseaux d'eau.

Photo 39 et Photo 40.

(Écosphère – M. Pajard) Il n'est pas nécessaire de régaler la terre végétale jusqu'au niveau de l'eau où elle risque de se dissoudre (voir photo de gauche) et d'enrichir excessivement les eaux.



Il n'est pas nécessaire de régaler la terre végétale jusqu'au niveau de l'eau où elle risque de se dissoudre (voir photographie 39) et d'enrichir excessivement les eaux.

L'emploi sur les zones terrestres

D'une manière générale, la fertilité des sols, si elle provoque un « boom » de biomasse n'est toutefois pas une bonne chose pour la biodiversité.

Pour les zones terrestres, la terre végétale doit être réservée à des emplois où une bonne reprise ou germination et une croissance rapide sont souhaitées : engazonnements, secteurs paysagés, plantations. Dans le cas des plantations, l'utilisation de terres trop riches provoque une forte concurrence avec les espèces herbacées et rend les paillages individuels indispensables.

Hormis les utilisations citées ci-dessus, on utilisera peu la terre végétale pour former la couche supérieure. Une faible épaisseur de terre végétale mélangée à l'horizon minéral sous-jacent par travail du sol est généralement suffisant. Si les stériles sont assez argileux et présentent une bonne capacité de rétention en eau, la terre végétale n'est pas nécessaire aux engazonnements.

Pour les habitats oligotrophes, on n'utilisera pas de terre végétale du tout. Il faut également prévoir, qu'avec les dénivellations, la terre végétale peut fluer vers le bas et recouvrir des secteurs situés en contrebas en modifiant la composition des sols.

Les techniques pour diminuer la fertilité d'une terre trop riche

Dans les restaurations de prairies ou de marais dégradés, des techniques de réduction de la fertilité ont été expérimentées, car l'excès de nitrates et de phosphates altère la valeur floristique. Ce cas de figure se présente aussi dans des sites de carrières aménagées avec de la terre végétale d'origine agricole, trop riche en éléments nutritifs, ou encore lorsque l'eau alimentant le site est chargée en nitrates et/ou phosphates. Un certain nombre de ces techniques expérimentales sont indiquées ici.

1) enlèvement de la terre végétale : cette technique consiste à revenir sur ce qui a été fait et à employer des engins de terrassement pour décaper la couche supérieure trop riche ; les résultats sont bons si la terre végétale est effectivement la cause de l'eutrophisation des sols ; il s'agit cependant d'une technique qui peut être coûteuse lorsque les engins de chantier ne sont plus sur place ; par ailleurs, les zones incriminées ne sont plus toujours très accessibles (pente, sol trop mouillé) ; enfin, cela suppose un enlèvement complet de la végétation en place.

2) le labour profond : lorsque les analyses de sol ont montré que la couche de remblais située sous la terre végétale était peu fertile, un labour profond (1 m environ) permet un mélange des deux couches ; cette technique peut être mise en œuvre avec du matériel agricole ; attention toutefois à ce que le mélange ne conduise pas à un substrat très difficile à travailler.

3) le brûlage : le brûlage (= brûlis) contrôlé de la végétation est efficace lorsque l'on a affaire à des sols déjà faiblement fertiles que l'on veut rendre très pauvres : par exemple pour établir une lande à bruyères sur une station de fougères aigle ou une pelouse calcicole sur une prairie mésotrophe. L'efficacité de cette méthode a été démontrée sur les dérivés azotés, elle est plus décevante sur les phosphates et le potassium. L'efficacité maximale est atteinte lorsque le feu couve au niveau de la base des chaumes et dans la litière. Cette technique supposant la manipulation du feu est cependant dangereuse et demande de grandes précautions. Enfin, répétée trop fréquemment, elle entraîne la dominance excessive d'espèces comme la Canche flexueuse (*Deschampsia flexuosa*), le Brachypode penné (*Brachypodium pinnatum*), la Molinie (*Molinia caerulea*) ou la Fougère aigle (*Pteridium aquilinum*).

La fauche avec exportation

La fauche avec exportation, c'est à dire en retirant les herbes coupées peut faire baisser la richesse nutritive du sol. Cependant, les expériences menées dans ce sens (sur des prairies), montrent que :

- la fauche avec exportation du foin ne doit être mise en œuvre que sur des formations mésotrophes à méso-eutrophes que l'on veut amener vers un niveau méso-oligotrophe ; dans le cas des végétations eutrophes à nitrophiles, l'exportation de biomasse n'a pas d'effets significatifs sur la végétation, les réserves nutritives du sol étant trop importantes pour être influencées par l'apport ou non de la végétation fauchée.
- les meilleurs résultats sont obtenus en réalisant deux fauches annuelles (mai-juin puis septembre-octobre) ; la fauche en mai-juin peut cependant être retardée jusqu'en juillet s'il faut protéger des oiseaux nicheurs sensibles.

L'adjonction de produits divers

Le mélange de la terre végétale avec du calcaire broyé a donné d'assez bons résultats, tandis qu'ils sont médiocres avec le sable. Le mélange avec du béton broyé a été proposé. L'adjonction de sulfates qui est parfois préconisée en agronomie, est déconseillée compte tenu

de ses effets écologiques mal connus. Cependant, ces techniques restent encore coûteuses et expérimentales.

D'une manière générale, il vaudra mieux prévenir les problèmes de surfertilité du sol : décapage par zone, décapage en trois couches, faible utilisation de terre végétale, utilisation des stériles au lieu de la terre végétale...

4.4.5. LA CONSERVATION DES QUALITÉS AGRONOMIQUES DE LA TERRE VÉGÉTALE

Outre sa richesse en matière organique, en nitrates et en phosphates, la terre végétale présente aussi une structure, souvent composée d'agrégats d'argiles et de matières organiques, qui lui assure une porosité à l'air et à l'eau et permet la fixation de minéraux indispensables aux végétaux. On y trouve une faune associée (bactéries, lombrics, arthropodes...) essentielle pour l'entretien des qualités du sol.

En général, on souhaite conserver ces qualités agronomiques, car il faudra réaliser des plantations ou des ensemencements ou du moins favoriser la croissance de la végétation. La conservation de la structure du sol est le plus souvent souhaitable, qu'il s'agisse de substrats fertiles ou non, or ces qualités de la terre végétale sont menacées soit au moment de sa manutention, soit lors de son stockage.

La manutention de la terre végétale

Les sols humides sont plus fragiles que les autres ; ils sont en particulier sensibles au passage des engins de terrassement et à la manipulation excessive. Dans ces conditions, ils sont rapidement sujets à la déstructuration et au compactage et par voie de conséquence à l'engorgement, néfaste à la croissance de la plupart des végétaux.

On a vu qu'il convenait d'organiser le chantier de décapage pour éviter le passage répété des engins sur les sols. Plus efficace est la planification du chantier en fonction de l'humidité des terrains. Le tableau XI indique les reports conseillés selon la pluviométrie.

Tableau XI. – Conseils pour la manipulation des terres selon l'humidité (d'après la société RMC).

Hauteur de pluie tombée au cours des dernières 24 h	Manipulation des sols avec dumpers et chargeurs
0 à 4 mm	Pas de problèmes
4 à 7 mm	Repousser les travaux d'une demi journée
5 à 15 mm	Repousser les travaux de 24 h
+ de 15 mm	Repousser les travaux de 48 h

La terre végétale est en général stockée en cordons ou merlons le long de l'exploitation. Là encore, il existe un risque de déstructuration et de compactage, suivi d'un engorgement, de phénomènes de lessivage puis d'hydromorphie (apparition de conditions anaérobies et réductrices) et enfin d'une mortalité des micro-organismes du sol (dégradation biologique).

Les risques sont accentués (1) par des hauteurs trop élevées des merlons (éviter de dépasser 1,5 m, (2) par la durée de stockage.



4.4.6. LA RECONSTITUTION D'UN SOL

Les matériaux disponibles

Les matériaux de remblais utilisés en surface, ainsi que leurs modalités de mise en place et de préparation, doivent être adaptés aux formations végétales ou aux habitats visés. On peut disposer pour cela :

- de la terre végétale (soit environ les 50 premiers centimètres correspondant à une couche humifère) ;
- d'une « sous-couche » moins riche que la terre végétale si l'on a procédé à un décapage en trois passes ;
- des stériles de découverte ;
- éventuellement de substrats particuliers issus de décapages sélectifs (terres tourbeuses, sablons, argiles très imperméables...) ;
- éventuellement de fines de lavage des matériaux.

Prendre modèle sur les sols existants

Dans le cas général des remises en état de carrières, on remblaye d'abord avec des stériles sur lesquels on régale la terre végétale. Or, il se trouve que sur l'ensemble d'un site d'exploitation, les terres végétales et les terres stériles peuvent varier de manière importante. Ceci explique un des défauts classiques rencontrés dans les remises en état, qui réside dans la superposition de deux horizons trop différents : par exemple un sable surmonté d'une argile lourde ou un sol calcaire surmonté d'une terre végétale acide... Dans ces conditions, les végétaux ont des difficultés à s'adapter aux deux couches suc-

cessives. Par exemple si l'on plante des essences acidophiles comme le châtaignier, lorsque leurs racines rencontrent la couche calcaire, les arbres commencent à avoir des problèmes sanitaires comme la chlorose, qui peut entraîner la mort en quelques années.

Une bonne manière d'éviter ce genre d'inconvénient est de prendre modèle sur des sols existants. En observant la végétation aux alentours du site, en réalisant quelques fosses pédologiques, en observant les fronts de taille, etc., un expert peut déterminer les grandes catégories de sols à reconstituer en utilisant les matériaux disponibles. Si le décapage a été réalisé par zones, comme mentionné plus haut, la reconstitution de sols favorables sera grandement facilitée.

La préparation du sol

Afin de rétablir un profil favorable, en particulier en évitant le problème des limites trop nettes entre les horizons, difficiles à franchir par les racines, la préparation du sol est généralement indispensable. Dans les cas classiques (la plupart des boisements, les prairies, les engazonnements) les opérations de préparation

sont conseillées dans l'ordre suivant :

- 1) décompactage profond des matériaux (sous-soleuse, ripper), s'il sont compactés.
- 2) en cas de présence de blocs en surface : broyage avec un broyeur de pierres.
- 3) mise en place de la terre végétale, si on en utilise.
- 4) pseudo-labour au chisel pour améliorer la structure du sol et établir un horizon de transition entre les couches.
- 5) travail superficiel du sol avec une herse rotative munie d'un rouleau "packer" (émiettement et léger tassement assurant une bonne remontée capillaire) ; l'ensemencement s'effectue habituellement à ce stade en utilisant un « combiné ». Cette étape est fondamentale pour favoriser l'enracinement et assurer un bon contact entre la terre fine et les graines et/ou les racines.

Cependant, dans les aménagements écologiques, on est très souvent amené à mettre en place des formations particulières, pour lesquelles toutes ces opérations ne sont pas nécessaires, voire pas souhaitables.

Photo 42. Prendre modèle sur les sols existants est un bon moyen de réussir la reconstitution d'un substrat favorable. On pourra par exemple reconstituer ce sol calcaire qui apparaît en haut d'un front de taille : une couche humifère surmontant une couche argilo-limoneuse, le tout mêlé de cailloux calcaires (Écosphère - M. Pajard).



Photo 43. Décompactage d'un sol au ripper (G. Arnal).



Photo 44. Passage d'une herse rotative sur un talus avant ensemencement (Ecosphère - M. Pajard).



Le décompactage profond est à éviter lorsqu'on crée des zones humides superficielles alimentées latéralement ou par les eaux de pluie : on ne cherche pas à rendre le substrat profond plus perméable ; si en revanche, on attend une alimentation par la nappe, le décompactage peut être souhaitable.

Les blocs de pierre en surface peuvent faire partie du biotope recherché (exemple : pelouses caillouteuses favorisant la nidification de l'Édic-nème criard). Dans ce cas, le broyage est à exclure.

Toutes les exceptions ne peuvent être citées, mais il faudra toujours peser les avantages du travail du sol (en particulier les étapes 4 et 5) pour une bonne végétalisation et les inconvénients qu'il pourrait entraîner vis-à-vis des caractéristiques de l'habitat recherché.

FIG. 67. – L'ambiance végétale artificielle est reconnaissable aux espèces choisies (saules pleureurs, conifères, peupliers d'Italie...), au gazon ras, à la pauvreté de la végétation de berge... (dessin M. Pajard)

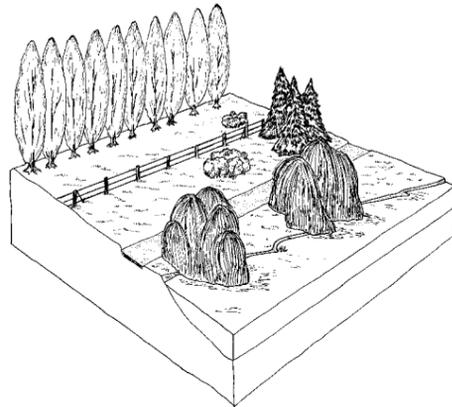


FIG. 68. – L'ambiance végétale rurale correspond à une nature entretenue de manière modérée ; les espèces végétales sont autochtones. (dessin M. Pajard)

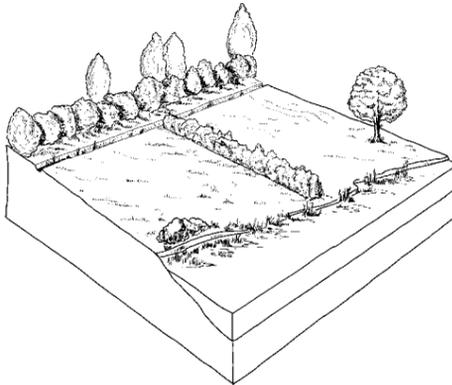
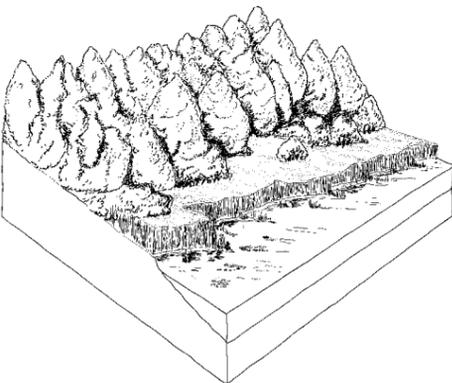


FIG. 69. – L'ambiance naturelle se trouve généralement dans des milieux difficiles d'accès où la végétation se développe spontanément avec peu ou pas d'entretien. (dessin M. Pajard)



4.5. La végétalisation

La végétalisation est le processus par lequel on passe d'un sol nu à un couvert végétal. Qu'elle soit le fait d'une colonisation spontanée ou qu'elle soit le fait d'interventions dirigées, elle est un aspect fondamental qui concerne tous les projets d'aménagement de zone humide sur une carrière en eau. La végétation est un élément essentiel de la « personnalité » d'un site ; les choix de végétalisation qui sont faits conduisent à des ambiances dont les schémas ci-contre donnent trois exemples très classiques : naturelle, rurale, artificielle.

Les résultats de la végétalisation dépendent de l'enchaînement des événements suivants :

- 1) la mise à nu des sols par le chantier d'extraction ;
- 2) la présence des graines ou autres propagules présentes dans le sol remis en place (banque du sol) ;
- 3) la colonisation spontanée par des végétaux provenant de l'extérieur
- 4) l'introduction de nouveaux végétaux ;
- 5) la dynamique végétale et éventuellement sa stabilisation.

La prise en compte de ces paramètres que l'on maîtrise plus ou moins bien conduit à différentes stratégies et modes de végétalisation.

4.5.1. VÉGÉTALISER OU LAISSER FAIRE ?

Laisser faire la nature

Laisser faire la nature consiste en général à préparer le sol. Ensuite, des espèces annuelles vont d'abord s'installer, supplantées par des espèces vivaces pionnières, puis des espèces vivaces de stades intermédiaires, et la végétation évoluera spontanément vers un équilibre naturel. Il y a effectivement de nombreux cas où de telles successions se déroulent avec succès sur des sites de carrière. Mais l'expérience montre que des problèmes peuvent se poser :

- 1) la diversité en espèces végétales obtenue en « laissant faire la nature » dépend en grande partie de la présence de stocks de graines à proximité ; en particulier, on ne trouve pas systématiquement dans l'environnement des milieux correspondant à ceux que l'on souhaite recréer.
- 2) les sols laissés à une colonisation naturelle sont souvent l'objet de la colonisation par une ou quelques espèces envahissantes (effet fondateur), qui peuvent ne pas correspondre à ce que l'on souhaite et qui ralentissent la diversifica-



Photo 45. Exemple de laisser-faire. Cette ancienne gravière inondée l'hiver n'a jamais été remise en état ; on y trouve cependant une végétation d'intérêt avec une espèce protégée (*Baldellia ranunculoides*). Toutefois, la colonisation a été très lente, la gravière ayant été abandonnée il y a 30 ans et la terre végétale n'ayant jamais été remise en place. Enfin, le site est dans une petite région naturelle dont la flore est remarquable ce qui a favorisé sa recolonisation (Écosphère – Ph. Dasnias).

tion du couvert végétal (massettes, saules, solidages...).

- 3) lorsqu'on utilise de la terre végétale provenant de terres agricoles, on est confronté au stock de graines d'espèces nitrophiles et envahissantes (chardons par exemple).

Végétaliser de façon dirigée

De nombreux arguments sont en faveur de la végétalisation dirigée, c'est à dire des ensemencements, plantations...

- la végétalisation initiale sert souvent à favoriser la succession naturelle en l'amorçant, alors que la colonisation naturelle peut être lente ;
- la colonisation spontanée est assez lente or la lutte contre l'érosion et surtout la stabilisation des rives sont essentielles et demandent (1) une végétalisation rapide, (2) le choix d'espèces adaptées ;
- la diversité végétale obtenue grâce aux propagules naturelles s'avère souvent décevante en l'absence de milieux naturels-sources à proximité ;
- introduire des végétaux permet d'orienter et/ou d'accélérer la dynamique végétale naturelle ; on peut donner l'avantage compétitif à une espèce désirée vis-à-vis d'une autre, par exemple au roseau commun par rapport aux massettes ou aux saules.
- tous les sols artificiels ne sont pas aptes à recevoir les propagules naturelles et il faut planter directement certaines espèces si l'on souhaite leur présence sur un site ;

- la création de différents types d'écrans végétaux est souvent souhaitable (brise-vent, « anti-bruit », contrôle de la fréquentation...)
- il y a souvent sur quelques parties du site, une nécessité de reverdir rapidement pour des raisons d'aspect extérieur : parties visibles de nombreuses personnes, longeant une route par exemple...

Des arguments contre la végétalisation dirigée

Cependant, dans certains cas la végétalisation active n'est pas sans inconvénients. Par exemple :

- il y a un risque non négligeable d'introduire des espèces envahissantes (espèces exotiques en particulier) qui peuvent déséquilibrer l'écosystème (ex. : buddleias, robiniers, ailantes, solidages...).
- il y a un risque de pollution génétique par des races génétiques inadéquates (cf. infra).
- la volonté de réussir les introductions amène souvent à utiliser des terres végétales trop riches voire à fertiliser et désherber, ce qui va à l'encontre de la préservation de la biodiversité.
- la végétalisation coûte cher et les résultats ne sont pas toujours garantis.
- dans certains cas, la végétalisation peut bloquer la dynamique végétale spontanée ou la retarder : la plantation de conifères empêche souvent le développement des feuillus ou bien les graminées d'un gazon ralentissent le développement d'espèces naturelles des pelouses ou des prairies.

Les techniques de végétalisation

A. Techniques "classiques" pour les milieux terrestres

A1. semis (avec semoir ou par semis hydraulique) pour les formations herbacées

A2. plantations de plants forestiers

A3. bouturage (principalement de saules à partir de prélèvement sur des stations naturelles)

B. Techniques "classiques" pour les zones humides

B1. plantation de jeunes plants d'hélophytes (roseaux et autres)

B2. introduction de végétaux aquatiques lestés et jetés dans l'eau

C. Techniques alternatives pour les milieux terrestres

C1. épandage de couches de terre, riches en graines, rhizomes, bulbes... (sélectionnées dans la nature environnante).

C2. déplacement de végétaux entiers ou de parties végétales (mattes, boutures, graines, rhizomes...) prélevés dans la nature environnante

C3. déplacement de formations végétales (prairies, landes...) par décapage superficiel et repositionnement sur le site spécialement aménagé

C4. épandage des produits de la fauche de prairies, de broyats de landes...

D. Techniques alternatives pour les zones humides

D1. repiquage de végétaux provenant de stations naturelles proches

D2. épandage de rhizomes

D3. mise en place de nappes pré-ensemencées ou pré-cultivées



Photo 46. Nappe pré-cultivée de Roseau commun (Écosphère - M. Pajard).

Plusieurs options peuvent être distinguées dans les modes de végétalisation, en fonction de l'origine des végétaux. C'est ce que les chapitres suivants abordent.

4.5.2. LE BOISEMENT OU L'ENGAGONNEMENT DE BASE, AVEC DES ESPÈCES ET VARIÉTÉS HORTICOLES, SÉLECTIONNÉES ET COMMERCIALISÉES

Cette méthode est encore aujourd'hui la plus classique dans les remises en état de carrières. Elle consiste à s'adresser à un horticulteur paysagiste afin qu'il se charge de planter et d'engazonner, sans lui donner de cahier des charges précis quant aux espèces souhaitées. C'est lui qui choisira les variétés à introduire. Pour les plantations, la plupart du temps, les paysagistes proposent un mélange d'essences indigènes (ex. : érable champêtre, chêne pédonculé...) et d'essences exotiques (ex. : chêne rouge d'Amérique, aulne cordé, pin noir d'Autriche...). Il y a même assez souvent des variétés ornementales (ex. : saule pleureur, variétés pourpres...). Pour les engazonnements, ce sont des mélanges de cultivars d'espèces à gazon qui sont proposés.



Photo 47. Plantations forestières avec leurs manchons de protection (G. Arnal).

Les avantages en sont les suivants :

- un coût souvent modéré
- l'existence de nombreux professionnels susceptibles de faire ce genre de végétalisation
- de grandes disponibilités et diversités des végétaux
- un reverdissement donc une fixation des sols souvent rapides
- la possibilité d'utiliser des variétés de graminées à croissance rapide (ray-grass, crénelle...) qui après avoir joué les rôles positifs d'un ensemencement préparatoire (effet visuel, lutte contre l'érosion, abri pour les semences des autres végétaux) régressent rapidement devant la concurrence des autres espèces.

Cependant, dans le cadre d'un aménagement écologique, cette solution est peu recommandée car elle ne conduit pas à la reconstitution de formations ayant une composition floristique « naturelle » et favorise une flore artificielle au détriment d'espèces sauvages qui auraient pu s'implanter.

Par ailleurs, les espèces non indigènes souvent proposées présentent différents inconvénients :

- mauvaise adaptation aux conditions locales de sol et de climat : citons par exemple le cas fréquent de l'introduction de conifères montagnards résistant mal aux sécheresses estivales.
- dans le cas des plantations, aspect ornemental plus adapté à un aménagement de type urbain qu'à un aménagement écologique, avec de nombreuses essences horticoles exotiques qui sont incongrues dans un contexte naturel.
- dans le cas des engazonnements, forte dominance du Ray-grass anglais, qui assure

Le problème des espèces exotiques envahissantes

Aux États-Unis, la question des espèces exotiques envahissant les zones humides créées est très souvent à l'origine d'échecs. En Grande-Bretagne on connaît le cas de l'espèce néo-zélandaise (*Crassula helmsii*) qui a envahi de nombreuses mares et plans d'eau, formant un tapis impénétrable et dont l'éradication se révèle pratiquement impossible. En ce qui concerne les gravières françaises, elles ne font pas à notre connaissance l'objet de tels problèmes. On peut certes citer certaines espèces non indigènes qui progressent sur les gravières mais sans y poser de problèmes particuliers : c'est par exemple le cas des Élodées (*Elodea canadensis*, *E. nuttallii*, *E. ernstiae*) ou de deux espèces du genre *Ludwigia* (*L. peploides*, *L. grandiflora*) qui sont des plantes américaines en progression dans l'Ouest et le Sud de la France. Ce phénomène est cependant à surveiller à l'avenir.

La pollution génétique des races végétales locales ou régionales par des semences cultivées

Une race régionale est représentée par une population d'une espèce donnée, dont le patrimoine génétique est adapté aux conditions régionales de l'environnement. Cette adaptation va même parfois jusqu'au niveau local et les races d'une vallée peuvent être différentes de celles de la vallée voisine. Les végétaux disponibles dans le commerce présentent les inconvénients d'être homogènes au plan génétique. En les introduisant, on va donc provoquer une hybridation avec les races locales. Les gènes particuliers aux races régionales sont susceptibles d'être éliminés. À force de multiplier ces hybridations on entraîne un appauvrissement génétique pour l'espèce.

un reverdissement rapide, mais régresse en 2 ou 3 ans, laissant fréquemment des tonsures ; il vaut mieux semer des espèces à croissance plus lente, mais durables (ex. : fétuque rouge).

- essences destinées à enrichir le sol comme le robinier faux-acacia (*Robinia pseudo-acacia*) ou l'aulne à feuilles cordées (*Alnus cordata*), alors que ce n'est pas l'objectif.
- pour les arbres, biocénoses associées pauvres [par exemple, une étude menée sur 28 essences en Grande-Bretagne a montré que celles qui étaient autochtones abritaient en moyenne 139 espèces d'insectes chacune, tandis que les espèces exotiques n'en accueilleraient que 16 en moyenne].

4.5.3. LE BOISEMENT OU L'ENHERBEMENT AVEC DES ESPÈCES NATURELLES COMMERCIALISÉES

Dans ce cas, on s'adresse à des fournisseurs spécialisés en leur précisant les espèces que l'on désire. Il s'agit d'espèces « sauvages », appartenant à la flore régionale et mises en culture. Cette solution s'est beaucoup développée dans les aménagements à vocation naturelle des carrières, dans la mesure où les plans de remise en état spécifient de plus en plus souvent les espèces à introduire.

Par rapport à la solution précédente, l'avantage est de pouvoir créer complètement ou partiellement une végétation composée d'espèces « naturelles » et donc d'obtenir des milieux et paysages très proches de ceux qui existent naturellement dans la région. Par ailleurs les coûts sont raisonnables en ce qui concerne les plants forestiers. Toutefois, l'offre est encore très insuffisante tant en nombre d'espèces proposées qu'en quantité de propagules (graines, rhizomes, plants...). Par ailleurs, cette option soulève divers problèmes :



Photo 48. Mise en place de godets sur le site aménagé (Écosphère - M. Pajard).

• **la pureté des lots de semences** : la réglementation concernant le matériel végétal ne concerne pratiquement que les graminées les plus utilisées en reverdissement : Ray-grass anglais, Fétuque rouge, Fétuque élevée, Pâturin des prés, Fétuque ovine, Agrostides, Brome inerme et quelques autres espèces comme l'Achillée millefeuille et l'Anthyllide vulnérable. Pour toutes les autres espèces, on peut avoir des surprises quant à la composition ne correspondant pas exactement aux espèces demandées, à la faiblesse du taux de germination...

• **les problèmes génétiques** : la plupart du temps, l'origine géographique des semences ou des plants n'est pas connue (il existe cependant quelques sociétés fiables à cet égard) ; on peut donc se trouver face à des végétaux appartenant bien à l'espèce demandée, mais génétiquement inadaptés aux conditions locales (par exemple, des semences d'Achillée millefeuille peuvent provenir de Nouvelle-Zélande ou des semences de Brome dressé du Canada). L'autre problème lié à la génétique est ce qu'on appelle la « pollution génétique » des races locales ou régionales (voir encadré).

Pour les différents inconvénients évoqués ci-dessus, on conseillera donc de s'orienter vers des mélanges simples, permettant la création d'un fonds floristique d'espèces communes (sans espèces rares dans la région), mais caractéristiques et représentatives du milieu visé. La densité sera de préférence faible afin de laisser les espèces spontanées venir compléter la composition floristique.

On trouvera dans la partie de ce guide réservée à la création d'habitats particuliers, des propositions de mélanges simples d'espèces correspondant aux milieux recherchés.

Photo 49. Déplacement à la pelle d'une grosse touffe (= touradon) de laîche paniculée pour remise en place sur un site aménagé (Écosphère – M. Pajard).



Photo 50. Mise en culture de plantes des marais chez un horticulteur (M. Pajard).



Photo 51. Mise en place sur une zone réceptacle de plaques de prairies humides, déplacées d'un site de gravière avant exploitation (Écosphère – M. Pajard).



Photo 52. Mise en place sur une berge réceptacle de moîtes de végétation prélevées à proximité (Écosphère – M. Pajard).



Photo 53. (Ph. Dasnias) et **Photo 54.** (Écosphère – Ph. Dasnias). Deux causes fréquentes d'échec des plantations. A gauche, un sol trop compact et mal préparé, à droite un choix d'espèces exotiques inadaptées (séquoias) aux conditions locales.



4.5.4. LA VÉGÉTALISATION À PARTIR DE RACES RÉGIONALES

La plupart des écologues considèrent donc qu'il faut privilégier les races régionales. L'introduction d'espèces locales peut se faire de différentes manières :

1) la récolte à partir de zones naturelles situées à proximité est souvent envisagée : récolte de graines, utilisation des produits de la fauche, transplantation d'individus, apport de litière, de produits de curage des fossés ou des mares riches en propagules diverses (graines, rhizomes, bulbes...), etc. ; toutes ces techniques donnent des résultats très variables selon les milieux et les espèces concernées ; il y a encore beaucoup à apprendre dans ce domaine ;

2) la mise en culture et la multiplication des semences chez un producteur professionnel à partir d'un lot récolté dans la nature (contrat de culture).

3) le déplacement pur et simple de portions de communautés végétales se développant sur ou à proximité du site ; cette technique ne se justifie que pour des milieux de grand intérêt floristique. Des précautions importantes sont à prendre si l'on veut assurer le succès de l'opération :

- il est préférable de « déplaquer » le sol en même temps que la formation végétale ; on conserve ainsi les interrelations complexes qui existent entre les appareils racinaires et le sol ;
- les opérations de « déplaquage » et de transport doivent être étudiées de manière à minimiser la déstructuration du sol et les dommages physiques aux plantes qui se trouvent alors en état de stress ;
- il est essentiel de veiller à éviter la dessiccation des végétaux et particulièrement du système racinaire qui peut être très rapide ;
- la remise en place doit être aussi rapide que possible.



Créer une végétation prairiale en utilisant du foin

Lorsqu'il se trouve à proximité du site une prairie ressemblant à ce que l'on souhaite reconstituer comme milieu, on pourra procéder comme suit :

1. Se renseigner auprès du propriétaire afin d'acquiescer à titre gracieux ou onéreux sa production de foin ;

2. Faire une analyse de sol - un simple prélèvement à la tarière peut suffire - afin de préparer sur le site un profil pédologique favorable ;

3. Faucher quand l'herbe est encore verte, juste avant qu'elle ne jaunisse, ceci afin que les graines restent adhérentes à la plante-mère ;

4. Transporter et épandre le foin le plus rapidement possible afin d'éviter les phénomènes de fermentation ; le foin doit recouvrir le sol sans être mélangé à la terre. Cette technique a donné de très bons résultats et permet d'obtenir une composition floristique proche du site donneur.

• les interstices entre les plaques doivent être aussi étroits que possible afin d'éviter que les espèces de friches ne s'y établissent (photo 51).

4) une solution intermédiaire consiste à transplanter des fragments de communautés végétales : pour des raisons pratiques diverses (coût, autorisation, accès...), il se peut qu'on ne puisse ou qu'on ne souhaite déplacer que des fragments de formations végétales ; ils sont ensuite insérés au sein d'une formation végétalisées par d'autres moyens : cette solution a donné des résultats satisfaisants.

Ces récoltes « artisanales » sont souvent la seule façon d'introduire des espèces non disponibles dans le commerce.

4.5.5. CONSEILS DE VÉGÉTALISATION

Un certain nombre de recommandations générales ou d'idées originales peuvent être préconisées dans le cadre de la végétalisation :

• la préparation adéquate du substrat est bien entendu recommandée (voir la préparation d'un profil favorable ci-dessus).

• choisir des espèces conformes au biotope et aux objectifs : pour ce faire, il est judicieux de s'inspirer de ce que l'on peut observer comme végétaux aux alentours du site.

• préférer les espèces indigènes et si possible les races locales (voir ci-dessus) ;

Deux causes fréquentes d'échec des plantations : un sol trop compact et mal préparé (photo 53), un choix d'espèces exotiques inadaptées (séquoias) aux conditions locales (photo 54).

• ne pas introduire d'espèces protégées ou rares dans la région : si c'est à partir de

Photo 55. Plantations à faible densité afin de permettre aux espèces naturelles de coloniser spontanément le milieu (Écosphère – M. Pajard).



stations naturelles la loi l'interdit pour les espèces protégées, si c'est à partir de produits cultivés, ce n'est pas souhaitable pour des raisons de pollution génétique (voir ci-dessus) dont les risques sont encore plus grands pour les espèces rares ou menacées.

• préférer des densités faibles à moyennes afin d'éviter une trop forte concurrence et permettre aux espèces naturelles de coloniser spontanément le milieu ;

• choisir les semis dits « agricoles » (travail du sol, léger enfouissement de la graine...) aux engazonnements hydrauliques ou *hydroseeding*, souvent proposés mais beaucoup plus coûteux et impliquant généralement l'emploi d'engrais et de produits conditionneurs.



Photo 56. L'engazonnement hydraulique (*hydroseeding*), une technique coûteuse et impliquant généralement l'emploi d'engrais et de produits conditionneurs (G. Arnal).

• pour les plantations, préférer des mélanges d'essences à des blocs monospécifiques ; les densités de plantation pour des boisements à vocation écologique doivent être plus faibles que ceux conseillés pour la sylviculture.

• l'apport d'engrais est inutile sur un site à vocation écologique où la productivité n'est pas le but recherché.

• éviter les espèces connues pour leurs tendances à être envahissantes (ex. : les ailanthes, buddleias, robiniers...).

• en général, il est inutile d'introduire des espèces qui colonisent manifestement le site par elles-mêmes.

• distinguer (1) les végétaux destinés à la colonisation initiale, (2) les végétaux souhaités à long terme.

• grouper les espèces de même taille et de même taux de croissance pour limiter la compétition.

• éviter les mélanges de graines vendus dans le commerce (risques d'introduction d'espèces indésirables, inadaptées...) ; préférer des mélanges élaborés par un spécialiste sur la base d'un diagnostic des caractéristiques de la parcelle à végétaliser.

Tableau XII. – Exemple fictif d'un projet de végétalisation d'une carrière en eau : le spécialiste de la végétalisation écologique dresse la liste des milieux à créer, les superficies concernées et fixe avec précision les modalités de création : type (plants, godets, semis, rhizomes...), densité, type de composition.

Milieux à créer	Superficies	Modalités de création
Chênaie-Charmaie et Chênaie-Frênaie	10,0 ha	Plantation de jeunes plants en godets forestiers - Densité : 1 500 plants/ha
Saulaie et autres boisements humides	0,5 ha	Plantation de boutures de saules (prélevées aux abords) et de jeunes plants en godets forestiers - Densité : 1 500 plants/ha
Bosquet et large haie mixte	0,1 ha	Plantation de jeunes plants en godets forestiers - Densité : 3 500 plants/ha
Haie arbustive à arborée dense (3 m de large x 6,000 ml)	1,8 ha	Plantation de jeunes plants sur 3 rangs en quinconce (1 m entre les rangs et 1,5 m sur le rang, soit 2 plants/m linéaire)
Verger plein vent	2,1 ha	Plantation de tiges de 10/12 avec une densité de 205 arbres/ha (7 m entre chaque sujet) + enherbement
Prairie mésophile (dont 8,000 m de cheminements)	16,5 ha	Semis agricole d'un mélange standard (graminées + légumineuses) - 50 kg/ha
Prairie "fleurie"	1,5 ha	Semis agricole d'un mélange diversifié (graminées + légumineuses + diverses) - 50 kg/ha
Formation clairsemée pionnière sur sable caillouteux	6,1 ha	Pas de végétalisation - Seules les espèces pionnières viendront s'installer spontanément sur ce substrat très difficile
Îlots sablo-graveleux	0,5 ha	pas de végétalisation
Prairie humide, jonçaie, cariçaie	30,4 ha	Semis agricole d'un mélange standard (graminées + légumineuses), complété d'espèces peu commercialisées - 50 kg/ha + Plantation d'amorce d'hélophytes en bordure des berges (1 plant/ml)
Roselière	11,3 ha	Plantation, semis et épandage de rhizomes, en utilisant le "matériel végétal" du site. On interviendra pour accélérer l'installation par une fauche en septembre/octobre
Mare et végétation associée	1,4 ha	Plantation d'amorce d'hélophytes et de végétaux aquatiques (5 000 plants, soit 1 plant/3 m ² ou 2 plants/ml de berges)
Végétation aquatique et hélophytique des hauts-fonds	7,5 ha	Plantation d'amorce d'hélophytes et de végétaux aquatiques (1 500 plants, soit 1 plant/ml de berges à hauts-fonds, périphérie des îlots exclue)
Fossés	4 400 ml	Colonisation spontanée
SURFACE TOTALE	89,7 ha	

4.6. Les techniques particulières liées à la gestion hydraulique

La gestion hydraulique consiste à pouvoir influencer sur les niveaux d'eau de la zone humide aménagée. Autrement dit, pour gérer hydrauliquement un secteur, on doit pouvoir contrôler complètement ou partiellement le rapport entre la quantité d'eau qui entre et celle qui sort. Lorsque l'on a affaire à des sites complètement baignés par la nappe, ce contrôle est difficile et en général peu souhaitable du point de vue de la libre circulation des eaux. Cependant, il est rare que le bilan hydrique d'une carrière en eau dépende uniquement des apports de la nappe. Il y a des situations où l'on peut jouer sur un différentiel entre les entrées et les sorties d'eau. Citons par exemple :

- la gravière hors nappe alluviale (moyennes et hautes terrasses alluviales) à substrat peu perméable (alimentée par les précipitations, les ruissellements, des petits cours d'eau, une nappe perchée...).
- la gravière dans la nappe, mais plus ou moins colmatée, phénomène qui se développe à mesure que les gravières vieillissent.
- la gravière endiguée pour des raisons de sécurité (par exemple au sein d'un méandre pour éviter sa capture par le cours d'eau, pour protéger des secteurs d'activité d'un débordement de celle-ci...) : cette situation, qui n'est pas à conseiller d'un point de vue hydraulique, peut cependant fréquemment se présenter dans les vallées aménagées.



Photo 57. L'inondation des saules en hiver et au printemps permet de limiter leur extension (G. Arnal).



Photo 58. Ces deux plans d'eau de gravières alluvionnaires ont été reconnectés par arasement de la digue qui les séparait : la petite chute d'eau illustre le dénivelé qui existait entre le plan d'eau amont (à droite) et le plan d'eau aval (à gauche) (Écosphère – M. Pajard).

- le cas particulier des bassins de décantation, où les fines imperméabilisent le plan d'eau.
- la gravière reposant sur des substrats imperméables (sables tertiaires très argileux par exemple).
- les plans d'eau de carrières de roche massive.
- etc.

D'autre part, dans le cadre des programmes de protection contre les dégâts des crues, les gravières seront de plus en plus sollicitées pour stocker des eaux. Or, cette utilisation peut être compatible avec un aménagement à vocation écologique et donner l'occasion de jouer sur le niveau d'eau.

4.6.1. LES AVANTAGES DU CONTRÔLE HYDRAULIQUE

Pouvoir contrôler les niveaux d'eau sur une zone humide présente de multiples avantages dont entre autres :

- limiter la progression des espèces des berges quand on souhaite conserver des milieux ouverts : les espèces « terrestres » sont normalement éliminées par une longue inondation hivernale, tandis que pour les hélophytes (espèces poussant dans la vase), il faut prévoir des inondations avec hautes eaux en période de végétation, en particulier au printemps.
- éliminer des espèces ligneuses (saules en général) qui envahissent des secteurs de marais, en maintenant un haut niveau d'eau jusqu'à ce que les arbres périssent.
- jouer sur la productivité des vasières, dont le rôle essentiel est l'alimentation en invertébrés des oiseaux : lorsqu'elles sont inondées ces zones ont une productivité modérée mais stockent de la matière organique ; lorsqu'on les exonde (= *assec*), on provoque un « boom » de productivité, celle-ci étant décuplée en moyenne ; après remise en eau, la végétation aquatique immergée et flottante, le plancton et la faune invertébrée sont stimulés, offrant aux oiseaux d'eau des possibilités accrues d'alimentation et de nidification ; l'idéal lorsqu'on dispose de plusieurs zones vidangeables est de pratiquer des périodes tournantes d'assec tous les 2 ou 3 ans.
- pouvoir baisser les niveaux pour réaliser des travaux d'entretien : reprofilage de berges, curage, faucardage...
- pouvoir réinonder des secteurs en cas de sécheresse.
- contrôler les conditions de germination des hélophytes et en particulier des phragmites (roseaux communs) qui sont optimales dans des boues humides mais pas inondées.

4.6.2. LES DIFFÉRENTES SITUATIONS POSSIBLES

Profiter des différences de hauteur de la nappe

Dans une plaine alluviale, la nappe ne constitue pas une surface plane et homogène. Un certain nombre de paramètres conduisent à des variations de niveau :

- naturellement, la nappe présente une pente (un pendage) de l'amont vers l'aval, ainsi que des bords du lit majeur vers le lit mineur ;

- les matériaux alluvionnaires ne sont pas homogènes et l'écoulement de la nappe peut se trouver ralenti au niveau de certaines zones argileuses imperméables ou accéléré dans des zones caillouteuses très perméables ;
- dans les larges plaines, on a souvent un système de terrasses alluviales qui, selon la nature des matériaux, peuvent créer des nappes perchées s'écoulant vers le lit majeur ;
- les infrastructures humaines (routes, voies ferrées, canaux, fossés de drainage, zones remblayées, bassins de lagunage...) ont découpé beaucoup de plaines alluviales en « casiers », chacun constituant une sorte de pallier dans la nappe : les plans d'eau de gravières eux-mêmes participent à ce morcellement.

C'est pourquoi, lorsque à l'occasion d'une exploitation de matériaux alluvionnaires, on crée différents plans d'eau, il arrive fréquemment que ceux-ci aient des hauteurs d'eau différentes. Ces différences de niveaux piézométriques peuvent être mises à profit en créant des systèmes de contrôle des eaux entre les plans d'eau amont et les plans d'eau aval.

Il ne s'agit que d'une gestion partielle, puisqu'on ne peut pas vidanger complètement un plan d'eau. Mais si par exemple le plan d'eau amont présente un niveau d'eau à 50 m et le plan d'eau aval à 49 m, on peut faire monter l'eau d'un mètre dans le plan d'eau aval en les mettant en communication par un système de vanne (voir les dispositifs ci-dessous). Dans le cas d'un grand site comportant plus de deux plans d'eau, on peut mettre en place un réseau de fossés, munis de systèmes de contrôle des eaux, permettant une alimentation sur tel ou tel secteur en fonction des besoins.

Jouer des différences de niveau d'eau avec un cours d'eau voisin

La présence d'un cours d'eau passant à proximité du site peut être mise à profit. En effet, on peut souvent utiliser des différentiels de niveau d'eau avec l'amont ou l'aval. Il est d'autre part fréquent que le niveau moyen du cours d'eau soit au-dessous de celui des plans d'eau de gravières (il peut même se trouver régulièrement ou temporairement au-dessus dans différentes situations. Ces cas se présentent également pour des carrières de roches massives situées à flanc de vallée. Moyennant des autorisations de communication avec la rivière, on pourra jouer partiellement sur les niveaux d'eau. Par exemple :

- en ouvrant la communication avec le cours d'eau, on fera baisser le niveau dans la carrière ;
- en fermant cette communication, on fera monter le niveau d'eau dans la carrière.

Ces différentiels, comme dans la technique précédente, ne permettent pas un contrôle total (comme une vidange par exemple), mais peuvent autoriser une montée ou une descente artificielles du niveau d'un plan d'eau.

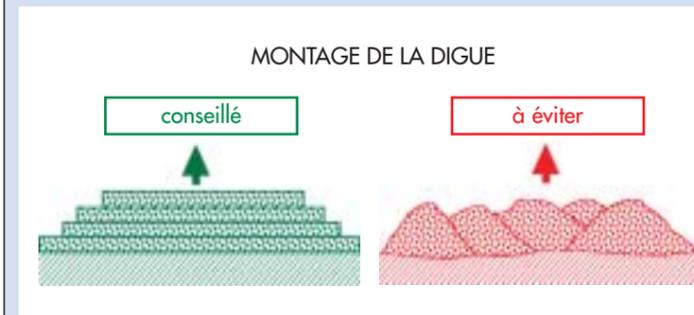
Créer un bassin réservoir d'eau

Dans certaines situations, on pourra capter des eaux (dérivation d'un cours d'eau, récupération des eaux s'écoulant du versant, utilisation des eaux d'un canal de dérivation des crues...) et les stocker dans un petit plan d'eau servant de réservoir d'eau utilisable à volonté. Dans ces conditions, il faut s'assurer d'un minimum d'étanchéité pour ce bassin réservoir. Les fonds de gravières et gravillons sont donc peu indiqués pour des excavations retenant les eaux. Les calcaires sont particulièrement peu étanches car ils sont le plus souvent fissurés.

Photo 59. On aperçoit au fond de la gravière, de couleur blanche, le petit delta formé par un ruisseau qui se déverse dans le plan d'eau ; ce type de captation d'un petit bassin versant par une carrière permet une gestion différentielle des niveaux d'eau (CNC - A.I.R.E.).



CONSEILS PRATIQUES POUR LA CONSTRUCTION DES DIGUES



La construction de petites digues destinées à retenir des eaux peut se présenter dans le cas de sites où l'on a opté pour une gestion dirigée des niveaux d'eau. Les digues retenant des hauteurs d'eau ne dépassant pas 3 à 4 m de hauteur, ne présentent pas de difficultés majeures en termes de sécurité. Pour des hauteurs supérieures mieux vaudra s'adresser à des spécialistes. Une digue est efficace tant en ce qui concerne la solidité que l'imperméabilité par sa masse, sa forme, les matériaux utilisés et la façon de les mettre en œuvre, enfin par divers dispositifs et mesures de sécurité.

Les matériaux utilisés et les travaux de terrassement

Il faut utiliser un mélange équilibré au niveau granulométrique, présentant en quantités équivalentes des cailloux, du sable, des limons et des argiles. Si l'argile est utile pour des raisons d'imperméabilité, utilisée seule elle est beaucoup trop instable. On doit éviter d'intégrer aux matériaux formant le corps de la digue des terres riches en matières organiques (terres très humifères, terres tourbeuses...) qui, après décomposition, laissent des espaces vides très préjudiciables à la solidité et à l'étanchéité de la digue.

La digue doit être montée par couches horizontales successives de quelques décimètres, chacune étant correctement compactée. Le roulage des engins de chantier peut suffire. Toutefois, pour assurer une bonne cohérence des matériaux entre eux, il faut que ceux-ci soient suffisamment humides : on ne travaillera donc pas par temps très sec.

C'est la partie centrale de la digue qui fait le plus office de barrière étanche. Cette étanchéité pourra être assurée par un remplissage d'argiles ou éventuellement par un mur de béton ou une membrane imperméable. La partie imperméable centrale doit être ancrée plus profondément que le reste de la digue afin d'assurer une liaison avec les matériaux en place et une meilleure étanchéité de l'ouvrage. Il ne faut pas planter d'arbres ou arbustes sur les digues : leurs racines risquent de créer des voies d'eau et en cas de chute ils peuvent détériorer l'ouvrage.

La forme de la digue⁽²⁴⁾

La largeur de la digue doit être au moins 5 fois sa hauteur : ceci a pour conséquence que la digue sera plus haute en son centre où le niveau d'eau sera le plus élevé. Le haut de la digue doit se trouver à au moins 1 m au-dessus

du niveau moyen des eaux (après tassement). La pente du côté des eaux retenues ne doit pas dépasser 33% (1:3) ; elle peut atteindre 50% (1:2) sur l'autre côté. Il est enfin conseillé de lui donner une forme courbe, la partie convexe dirigée vers les eaux de retenue.

Déversoir de sécurité

Si le plan d'eau peut être amené à recevoir des crues incompatibles avec la capacité des systèmes normaux de contrôle des eaux (buses, moines, déversoir-seuil...), la digue risque d'être submergée avec de graves inconvénients pour sa stabilité. Aussi faut-il prévoir dans ce cas un déversoir de sécurité. Il doit se trouver à 30 cm sous la hauteur maximale de la digue et être large et peu profond afin de ne pas créer un fort courant d'eau qui pourrait avoir des effets érosifs fâcheux. Si possible, le déversoir de sécurité ne doit pas être localisé sur la digue elle-même, mais latéralement ; s'il est sur la digue elle-même, il vaut mieux l'installer au bord de celle-ci qu'en son milieu.

⁽²⁴⁾ En partie d'après MERRITT A. – *Wetlands, Industry & Wildlife* – 1994 – The Wildfowl & Wetlands Trust.

En revanche, les fonds sableux, perméables au départ, s'imperméabilisent progressivement en bloquant les particules fines ; on estime qu'ils sont d'une étanchéité acceptable après 2 à 3 ans. Cependant, les matériaux naturels les plus adaptés sont bien sûr les argiles.

Le cas des carrières de roches massives

Lorsque le carreau d'une carrière de roches massives est en eau mais qu'il est le point le plus bas du secteur, il n'y a pas moyen de jouer sur les niveaux d'eau sinon en utilisant des pompes. Cependant, si un cours d'eau passe à proximité, on peut l'utiliser pour recevoir l'émissaire du plan d'eau. On pourra d'ailleurs élever artificiellement le niveau du plan d'eau en élevant une digue entre la carrière et la vallée.

4.6.3 LES SYSTÈMES DE CONTRÔLE DES EAUX

Si l'on opte pour une gestion hydraulique dirigée, cela suppose de pouvoir disposer de systèmes de contrôle d'entrée (prise d'eau) et de sortie (vidange) des eaux. Un certain nombre de systèmes classiques sont présentés ici. Cependant, les ouvrages devront être calibrés et conçus (solidité en particulier) en fonction des débits, y compris exceptionnels, qu'ils pourront avoir à supporter. Il n'est pas possible d'envisager ici tous les cas.

Les pompes

Les pompes sont largement utilisées sur les carrières où elles servent à rabattre la nappe ou à évacuer les eaux d'exhaure du carreau. Elles peuvent aussi être utilisées dans le cadre d'un site à vocation écologique. Leur avantage est évidemment de pouvoir faire circuler les eaux contre le gradient d'écoulement gravitationnel. Cependant, il faut pouvoir déverser les eaux pompées dans un autre plan d'eau. Si les eaux doivent être rejetées dans le réseau hydrographique, cela suppose des autorisations et généralement la mise en place d'un bassin de décantation.

Les pompes diesel sont souvent bruyantes et consommatrices de carburant, ce qui ne leur donne pas une image « écologique ». Les pompes électriques sont plus silencieuses mais onéreuses. À noter cependant, la possibilité d'utiliser des pompes photovoltaïques. Il est de façon générale peu conseillé de les utiliser pour une gestion hydraulique permanente. En revanche, elles seront très utiles pour des entretiens occasionnels comme le curage d'un plan d'eau ou d'une mare.

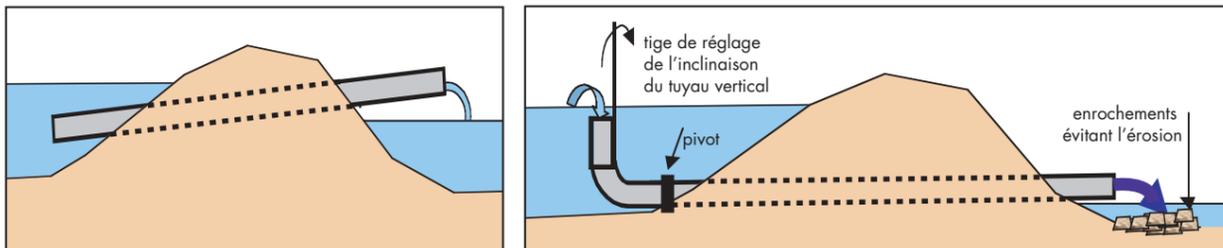
Un système ancien et pourtant peu souvent mis en œuvre est celui des pompes actionnées par l'énergie éolienne.



Photo 60. Cette éolienne, construite dans le cadre d'un aménagement de carrière, permet une gestion hydraulique du site (Écosphère – M. Pajard).

FIG. 70. – (à gauche) Schéma d'une buse déversoir. Il est conseillé d'incliner l'orifice amont afin d'éviter une obstruction de la buse par des feuilles.

FIG. 71. – (à droite) Schéma d'une buse pivotante. Ce système est en même temps satisfaisant et peu onéreux.



Les déversoirs

Les déversoirs fonctionnent selon le principe des seuils. Ils n'entrent en service que lorsque le niveau d'eau dépasse une certaine cote à l'amont. Ils peuvent par exemple être mis en place entre un cours d'eau et des carrières, si l'objectif est un fonctionnement calqué sur les rythmes hydriques naturels : les plans d'eau sont alors directement alimentés par le cours d'eau à partir d'un certain débit (ce type de solution encore peu expérimenté demande évidemment des précautions : prise de contact avec les administrations compétentes, études hydrologiques, consultation de spécialistes en ouvrages hydrauliques...).

Le principe général d'un déversoir est de faire en sorte qu'il supporte des lames d'eau assez faibles et que le courant y reste modéré, ceci afin d'éviter que les eaux ne dissipent une grande partie de leur énergie sous forme d'érosion. Un déversoir doit donc être nettement plus large que profond, et sa pente régulière afin d'éviter les accélérations du courant. Si les débits attendus sont modestes, il pourra être en terre engazonnée ou en terre incrustée de tout-venant. Lorsque des débits plus forts sont prévus, il vaut mieux s'orienter vers un déversoir maçonné et muni de seuils.

Les buses

Les buses sont des tuyaux de types divers, souvent en béton ou en matières plastiques, qui passent au travers de digues. On trouve aussi sur le marché des tuyaux flexibles mais très résistants, en polyéthylène, constituant l'une des solutions les moins coûteuses. Afin qu'elles constituent un ensemble solidaire, il est conseillé de poser les buses sur un radier en béton armé. On veillera cependant à bien colmater l'ensemble, qui constitue souvent un point faible dans la digue et peut être à l'origine de fuites.

Hormis les matériaux et les calibres, les buses peuvent être classées selon trois grandes catégories.

- **les buses-déversoirs** comme les déversoirs fonctionnent à partir d'un certain seuil atteint à l'amont ; pour éviter des jets trop forts à la sortie, il vaut mieux utiliser en série plusieurs buses de diamètre moyen, qu'une seule de gros diamètre ; pour éviter qu'elles ne se bouchent avec des feuilles, une technique consiste à les incliner côté amont afin que leur orifice soit toujours submergé.
- **les buses pivotantes** : divers systèmes permettent de régler la hauteur de la prise d'eau de la buse. L'un des plus astucieux et des moins onéreux consiste à articuler la buse à un tuyau vertical inclinable.
- **les buses avec volant de réglage** sont munies à l'amont d'un volant permettant de régler le débit et d'un clapet anti-retour à l'aval.

La vanne à batardeaux

Les batardeaux sont des planches en bois imputrescible de quelques cm d'épaisseur que l'on enfle les unes par-dessus les autres dans des rainures verticales. Le dispositif est installé au niveau d'une ouverture dans la digue, à laquelle il doit être bien arrimé (ouvrages en maçonnerie ou en métal). On peut également l'installer en pied de berge et le relier à une buse d'évacuation. En retirant ou en ajoutant des planches, on fait baisser ou monter le niveau du plan d'eau de retenue, selon un processus de trop-plein. L'avantage du bois est qu'il gonfle lorsqu'il est dans l'eau assurant ainsi une bonne étanchéité.

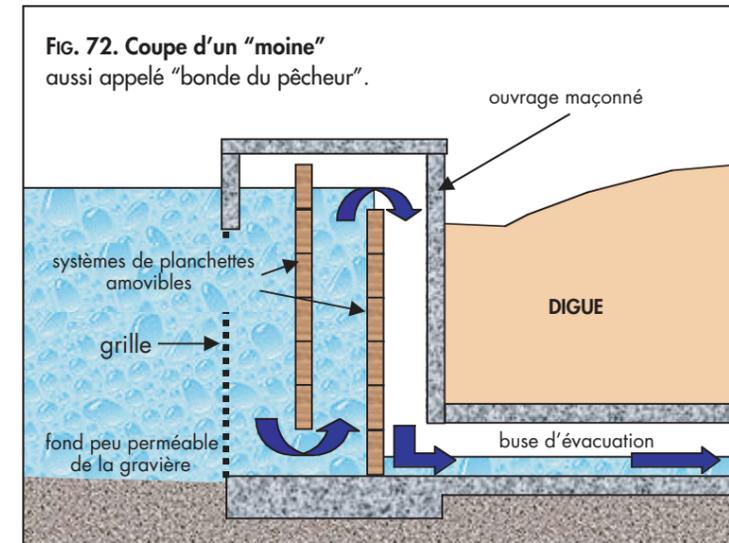


Photo 61. Système de déversoir à batardeaux mis en place dans le cadre d'une réhabilitation de carrière (Écosphère – M. Pajard).



Tableau XIII. – Points forts et points faibles des principaux systèmes de gestion hydraulique				
	Buse pivotante	Vanne simple à batardeaux (sans buse)	Moine = bonde du pêcheur	Vanne à tablier et crémaillère
■ point faible				
■ point fort				
Débit	■	■	■	■
Régulation des niveaux d'eau	■	■	■	■
Pérennité	■	■	■	■
Fréquence de réglage	■	■	■	■
Facilité de réglage	■	■	■	■
Risques d'obstruction	■	■	■	■
Risques de vandalisme	■	■	■	■
Coût	■	■	■	■
Complexité de la conception	■	■	■	■
Facilité d'installation	■	■	■	■
Disponibilité du matériel	■	■	■	■

Modifié d'après MERRITT A. – *Wetlands, Industry & Wildlife* – 1994 – The Wildfowl & Wetlands Trust.

Le moine (ou bonde du pêcheur)

Le moine est un système très classique de vidange et de contrôle hydraulique des plans d'eau. Il permet un bon réglage des débits et une évacuation des eaux soit par le haut (il fonctionne alors comme déversoir), soit par le bas (on évacue alors les eaux profondes qui sont moins oxygénées et moins riches en plancton). Le principe de base est là aussi fondé sur des systèmes de planchettes qui coulisent dans des rainures et s'empilent les unes sur les autres. Disposé contre la berge, sa hauteur est du même ordre que celle de la digue. Le coffrage en béton ainsi que le radier en béton armé, sur lequel reposent le moine et la buse à laquelle il est relié, doivent être des ouvrages solides en particulier si le plan d'eau est profond et qu'il y a des risques de crue brusque ou de gel. L'inconvénient du moine réside dans un coût plutôt élevé.

La vanne à tablier

Dans ce système, il s'agit de baisser ou hausser un tablier coulissant, qui laisse s'évacuer plus ou moins d'eau à sa base. Le système peut être assez rustique, le tablier étant alors soulevé ou abaissé par une sorte de tige ou « pelle » que l'on peut bloquer à diverses hauteurs. Le système contrôlé par une crémaillère est plus coûteux mais beaucoup plus solide : il est surtout utilisé lorsque les volumes d'eau à évacuer sont importants, par exemple lorsque le plan d'eau doit être mis en assec.

4.6.4. LES PROBLÈMES DE POLLUTION DES EAUX

Les plans d'eau de carrière peuvent être soumis à des problèmes de pollution. La première des mesures consiste à contrôler la nature des eaux entrant dans le plan d'eau afin de localiser les sources de pollution. S'il est possible d'épargner au plan d'eau ces apports, sans modifier leur écoulement initial, ce sera déjà une solution. Par exemple, un plan d'eau de gravière n'est pas obligé de drainer les fossés alentour alors que ceux-ci ont des eaux de mauvaise qualité. On peut tout à fait leur faire contourner le site, en restituant leur écoulement à l'aval.

Les solutions chimiques

Pour lutter contre les excès de phosphate⁽²⁵⁾ qui se traduisent souvent par la prolifération d'algues filamenteuses, certains préconisent les sels de fer ou d'alumine, qui font précipiter les phosphates. Ces solutions chimiques peuvent avoir un effet ponctuel, mais ne traitent pas le problème à sa source. En cas d'usage répété, la toxicité de tels additifs se pose.

⁽²⁵⁾ Les taux de phosphate mesurés sur gravières sont extrêmement variables ; la pollution par les phosphates concerne surtout des carrières reliées à des cours d'eau.

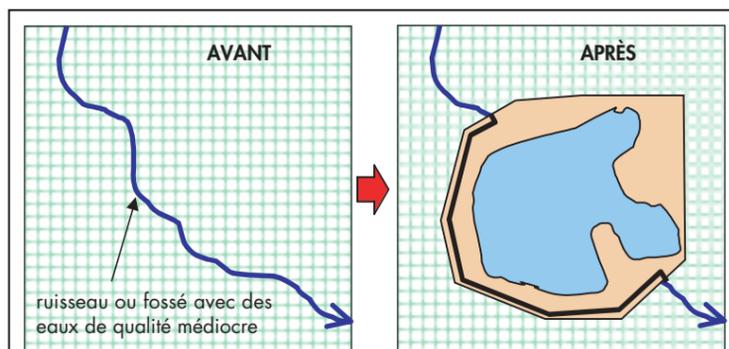
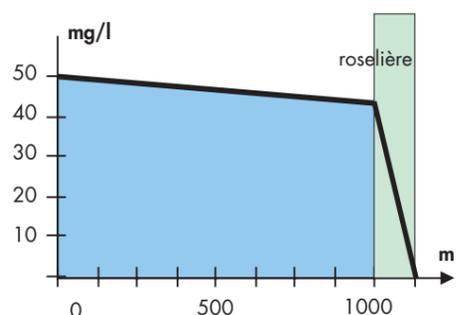


FIG. 73.- Lorsqu'un ruisseau ou un fossé de qualité hydrique médiocre traverse le site exploité, il vaudra mieux qu'il ne se déverse pas dans le plan d'eau après aménagement.

FIG. 74.- Réduction de la teneur en nitrates des eaux après passage dans une roselière à *Phragmites australis* (d'après KLOTZLI - 1967 (in AMOROS & PETTS op.cit.).



Les pièges à sédiments

Une bonne partie des polluants, en particulier les métaux lourds ou les phosphates se lient aux fines particules d'argile en suspension dans l'eau (= « matières en suspension » généralement abrégé en MES). En conséquence, une bonne solution pour éviter à un plan d'eau une partie de la pollution est de créer un piège à sédiments. Cette solution convient surtout à des carrières recevant des effluents agricoles ou urbains.

Elle consiste à diriger les écoulements pollués ou suspects vers une sorte de bassin de lagunage. Lorsque le courant ralentit, les MES se déposent, entraînant les particules de polluants qui leur sont liées. Ces bassins doivent être munis de rampes d'accès afin de pouvoir être régulièrement curés.

Photo 62. Roselière se développant spontanément sur un bassin de décantation de gravière (Écosphère – Ph. Dasnias).



Les bassins de lagunage avec des végétaux

Compte tenu de leurs capacités naturelles d'épuration, les hélophytes et particulièrement le roseau commun (*Phragmites australis*), mais aussi l'Iris d'eau (*Iris pseudacorus*), le Jonc des chaisiers (*Schoenoplectus lacustris*), le Rubanier rameux (*Sparganium erectum*) et les Massettes (*Typha latifolia*, *T. angustifolia*) sont très efficaces pour améliorer la qualité des eaux (ils sont utilisés dans le traitement des eaux usées). On peut donc réaliser un bassin spécial où l'on fera circuler les eaux entrant dans le plan d'eau à travers une roselière. Ce type de système se cumule d'ailleurs avec les avantages d'un piège à sédiments. Il faut toutefois prévoir de faucher régulièrement en exportant les produits de la coupe, pour exporter du même coup les polluants.

4.7 L'utilisation des bassins de décantation

Lorsqu'il existe sur le site une installation de traitement des matériaux, il y a généralement un ou plusieurs bassins de décantation recevant les eaux de lavage des granulats. Ce sont les matériaux les plus fins (= fines de lavage) qui s'y déposent, avec un gradient granulométrique : des sables fins près de la sortie, puis des limons et enfin des argiles.

Les bassins de décantation constituent des opportunités dans le cas d'aménagement écologique. Ils peuvent en effet servir à différents usages. Cependant, pour pouvoir intervenir dans le bassin de décantation lui-même, il faut attendre qu'il se ressuie, ce qui peut prendre plusieurs années.

Bassin de lagunage

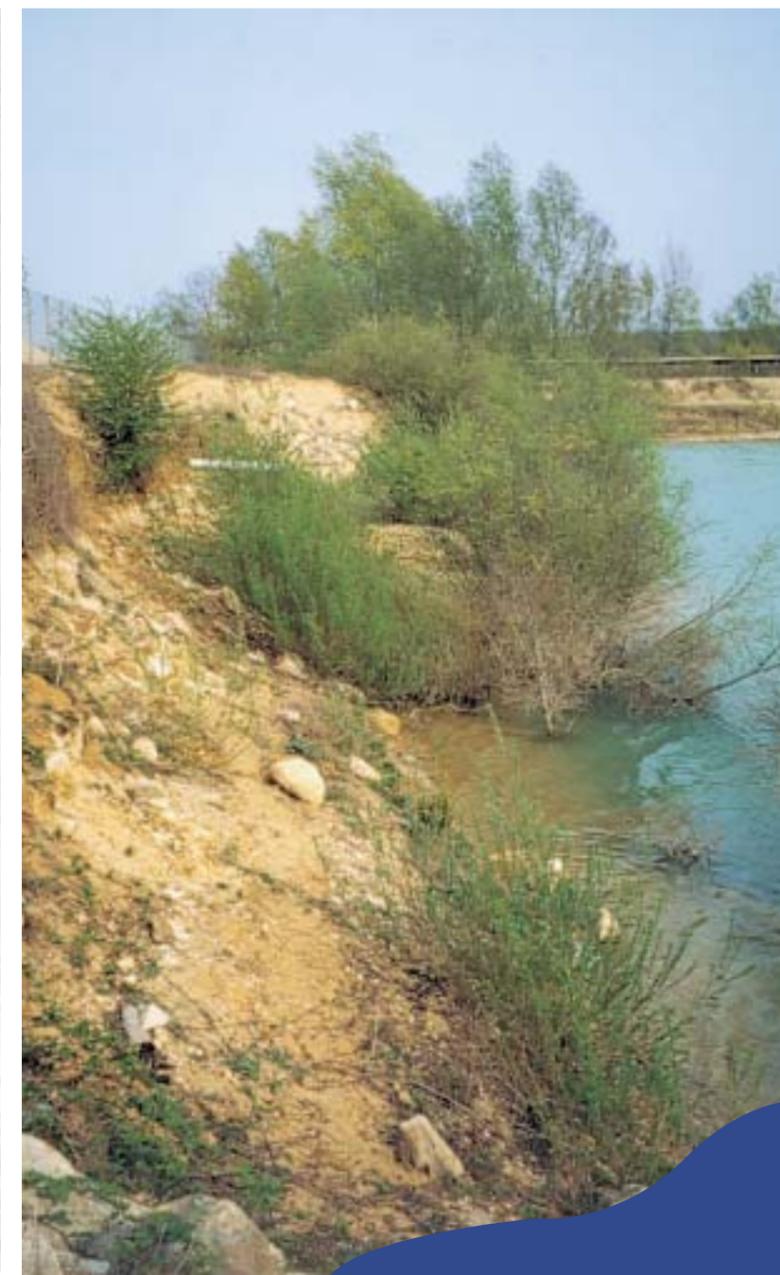
Spontanément les bassins de décantation se peuplent d'hélophytes, en particulier de massettes (*Typha sp.*), plus rarement de roseau commun (*Phragmites australis*). Si les eaux alimentant le site présentent des qualités douteuses, le bassin servira au lagunage. Il faudra cependant entretenir un niveau d'eau suffisant afin d'empêcher la colonisation par les saules.

Grèves argileuses, "vasières"

Lors de leurs passages migratoires automnaux et printaniers, de nombreux oiseaux d'eau, particulièrement les Limicoles, sont attirés par des zones boueuses humides ou inondées sous quelques cm d'eau. Ce sont des zones permettant le repos et l'alimentation. Quand ces zones sont riches en matières organiques et sont très productives (particulièrement en larves de chironomes), on parle de vasières. D'anciens bassins

Photo 63. (à gauche) Bassin de décantation fonctionnant comme une grève alluviale (G. Arnal).

Photo 64. Une ancienne gravière qui n'avait pas été remise en état : les berges sont très raides, les secteurs un peu moins abrupts étant colonisés par une végétation dense de saules (Écosphère – M. Pajard).



de décantation peuvent jouer ce rôle, soit en les laissant tels quels, soit en les ouvrant au niveau d'une digue afin de laisser fluer les fines : cette dernière solution est recommandée quand le bassin, totalement comblé, ne peut plus être inondé. En effet, afin de ne pas être colonisées par les hélophytes, puis les saules, les grèves argileuses doivent être soumises à des inondations hivernales et même printanières assez importantes. Pour ce faire, la possibilité de disposer de systèmes de gestion hydraulique est un atout.

Bassin de retenue des eaux

Un bassin de décantation possède l'avantage d'être largement étanche, en particulier sur le fond qui est recouvert d'une épaisse couche argileuse. En rehaussant les digues aux endroits voulus et en mettant en place des dispositifs de prise d'eau et de vidange, on peut transformer un bassin de décantation en un remarquable bassin de retenue des eaux.

4.8. Les techniques particulières liées à la restauration des anciennes gravières

La réhabilitation d'anciennes gravières est un cas de restauration écologique qui pourra être amené à se présenter de plus en plus souvent, en particulier dans les projets d'aménagement intégré de secteurs exploités. Il existe deux principaux types d'anciennes carrières :

- 1) le type de gravières rectangulaires ou polygonales, avec des berges de l'ordre de 10 m de largeur, plantées d'arbres en ligne ou envahies de saules ombrageant les eaux ; les pentes sont raides et il n'y a pas d'îles ;
- 2) le type issu des anciennes exploitations depuis des langues de terre, présentant un périmètre très indenté vu de loin, mais linéaire dans le détail ; là encore les berges

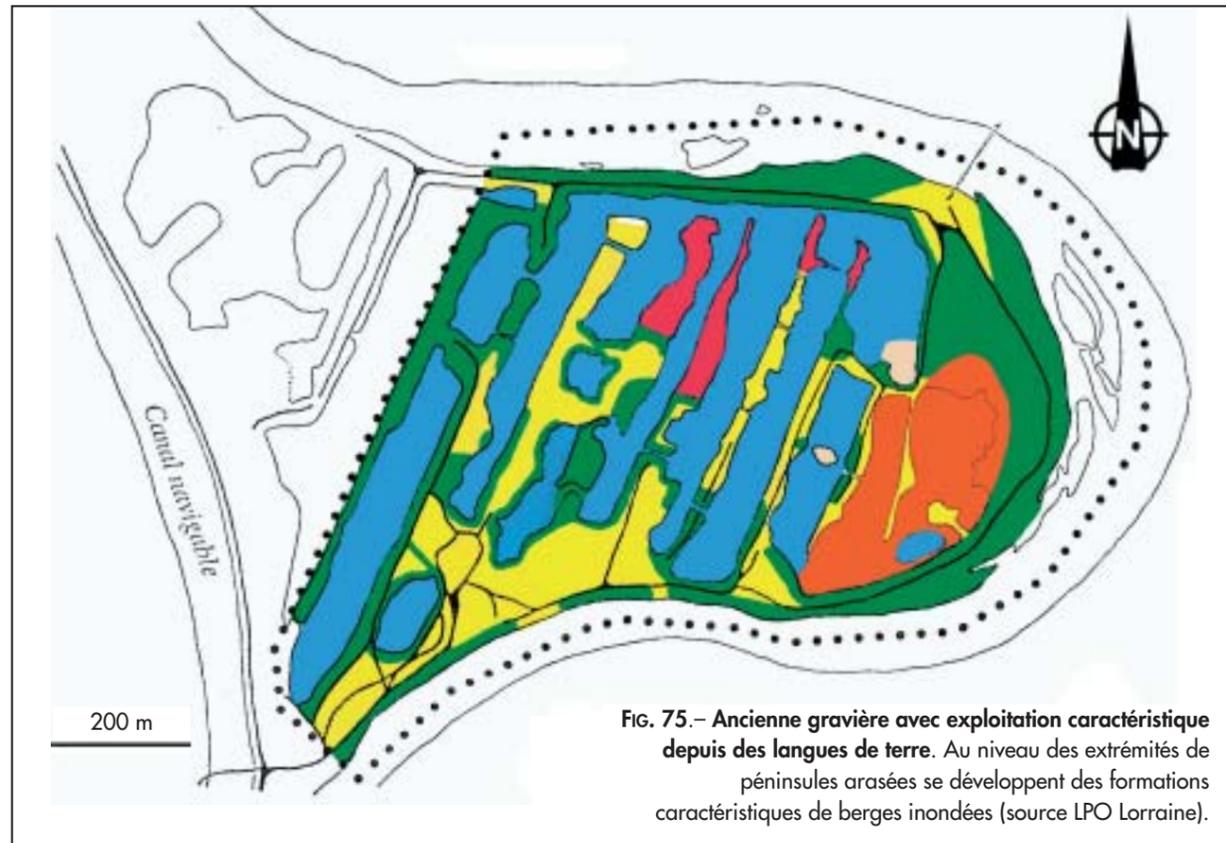


FIG. 75.- Ancienne gravière avec exploitation caractéristique depuis des langues de terre. Au niveau des extrémités de péninsules arasées se développent des formations caractéristiques de berges inondées (source LPO Lorraine).

- Formations boisées (arborescentes et arbustives)
- Prairies
- Roselières
- Zones inondées
- Dépôts de fines
- Surface en eau
- Chemins
- Limite du site

Photo 65-65b.

Réhabilitation d'une ancienne gravière : à gauche dessouchage des saules qui avaient envahi les berges, à droite reprofilage des berges en pente douce (Écosphère - M. Pajard).



sont raides et étroites ; les nombreuses péninsules donnent un accès aux hommes et aux prédateurs ; souvent les plantations ligneuses de berge sont excessives.

Le tableau XIV recense les principaux travaux susceptibles d'améliorer les caractéristiques écologiques d'une ancienne gravière.

4.9. L'introduction d'espèces animales

Si l'introduction d'espèces végétales, on l'a vu, n'est pas sans poser des questions éthiques, juridiques et scientifiques, celle des espèces animales est encore plus problématique. Ce chapitre traite d'ailleurs plutôt de la « non - introduction » que de l'introduction des animaux.

On comprendra les difficultés que pose l'introduction d'animaux dans le cadre d'un aménagement à vocation écologique, en abordant quelques thèmes y étant relatifs.

Éviter le parc zoologique

L'aménagement d'un site appelé à s'intégrer dans son environnement naturel ne consiste pas à fournir « clés en mains » un espace naturel doté d'une collection d'espèces animales rares, pédagogiques ou spectaculaires. Non qu'il s'agisse en soi d'un objectif inacceptable, à condition qu'il ne conduise pas à prélever des espèces rares dans le milieu naturel, il s'agit seulement d'un objectif différent. Des espèces comme le Canard mandarin ou l'Oie d'Égypte peuvent être adaptées à un parc urbain, elles ne le sont pas à un site écologique. Outre le fait que ces espèces sont totalement exotiques, elles entreraient inutilement en concurrence avec les

TABLEAU XIV.- Techniques de réhabilitation des anciennes gravières.

PROBLÈME	SOLUTION
Berges trop raides : interface terre / eau abrupte	Importation de remblais propres pour créer des hauts-fonds Reprofilage des berges en déversant les déblais dans le plan d'eau
Contour linéaire ; longueur minimale de berges	Faire des indentations particulièrement le long des berges abritées ; utiliser les déblais pour la création de promontoires ou de hauts-fonds
Manque de hauts-fonds	Reprofilage des berges Araser les langues de terre de façon qu'elles atteignent 20 cm au-dessus du niveau d'eau en leur centre et 30 cm au-dessous sur leurs bordures ; creuser un fossé large et profond (5 m x 1 m) pour les isoler du "continent"
Pas d'îles	En créer en recoupant les langues de terre (voir ci-dessus) Installer des radeaux flottants
Présence d'anciens stocks de matériaux (terre végétale, découverte, parfois même gisement)	Araser ces stocks résiduels et valoriser ces matériaux : création de hauts-fonds, diversification des substrats...
Déficit de plantes aquatiques du fait de l'ombre excessive portée par les arbres	Couper sélectivement sur les côtés est et sud ; conserver les coupe-vents
Manque d'habitat pour les oiseaux d'eau nicheurs ; faible succès de la nidification	Faire des îles Tailler les arbres et buissons ; stocker les branches en ligne pour procurer des abris Abattre des arbres dans l'eau Élaguer les arbres portant ombrage pour aider la végétation de berge Introduire des hélrophytes (roseaux, etc.) Conserver les herbes hautes et les ronciers Créer des hauts-fonds ensoleillés pour aider la production végétale et stimuler les larves de chironomes (diptères).
Déficit en zones marécageuses, en mares ou en habitats terrestres	Dégager et reprofilage le bassin de décantation ou d'autres zones du site
Présence de plantations arbustives et arborées à base d'essences exotiques	Convertir progressivement en coupant de manière localisée les essences indésirables pour favoriser la recolonisation spontanée et éventuellement pratiquer des plantations complémentaires d'espèces indigènes.

Adapté et complété d'après ANDREWS J. & KINSMAN D.- Gravel pit restoration for wildlife - 1990 - Tarmac Quarry Product, RSPB.

espèces venant s'établir spontanément. De plus, elles n'auront que peu de chances de coloniser d'autres sites (même si des espèces comme la Bernache du Canada, introduites entre autres à partir des gravières, arrivent à maintenir une population spontanée en Europe).

Introduction d'animaux et équilibre écologique

L'introduction d'espèces diverses et variées qui a été très en vogue sur les plans d'eau, en particulier au siècle dernier, ou qui a été accidentelle, est aujourd'hui considérée comme une manipulation écologique à risques. On sait par exemple les dégâts causés par des espèces exotiques lâchées dans la nature comme le Ragondin ou le Rat musqué. Les introductions d'espèces se font après des études scientifiques et concernent des territoires dépassant celui d'un site de carrière, fût-il très grand.

Les aspects juridiques

La loi soumet l'introduction des espèces protégées à l'autorisation de l'administration de tutelle, à savoir la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN). Par exemple, chez les oiseaux et les mammifères, toutes les espèces non chassables sont protégées.

L'introduction de gibier

Il est possible que le site remis en état écologiquement soit également à vocation cynégétique. Cependant, pour les raisons évoquées ci-dessus, il est déconseillé d'introduire des espèces gibier non autochtones (Faisan de Colchide, Faisan vénéré, Colin de Virginie...). Quant aux lâchers d'espèces autochtones d'individus d'origines géographiques diverses (Perdrix par exemple), ils contribuent à affaiblir le patrimoine génétique des races locales (il s'agit du même débat qu'à propos des espèces végétales).

D'ailleurs a priori, sur un site écologique, on peut considérer que la chasse ne doit jouer qu'un rôle de prélèvement sur les espèces naturelles qui peuvent le supporter.

Les Poissons

La question de l'introduction de poissons se posera si le site est amené à accueillir des pêcheurs en cas d'isolement hydraulique. S'il est relié à un cours d'eau, de façon permanente ou intermittente (crues), l'introduction de poissons est peu utile puisque le peuplement se fera spontanément avec les espèces locales.

L'introduction de poissons (site isolé) n'est pas un objectif écologique en soi, puisque l'on sort du fonctionnement naturel normal. Il est cependant d'une relative innocuité :

- si l'on s'abstient d'introduire des espèces exotiques indésirables comme la Perche Soleil (et bien entendu le Poisson-chat ou le Silure) se développant au détriment des espèces indigènes ;
- si l'on se contente d'une productivité moyenne ; lorsqu'ils sont trop nombreux les poissons déséquilibrent l'écosystème : concurrence pour la nourriture avec les Oiseaux d'eau, prédation excessive sur le plancton, les Amphibiens, les Odonates..., concentration excessive de cormorans hivernants... D'autre part, la fertilisation d'un plan d'eau pour augmenter la production de poissons suppose une augmentation de la richesse nutritive (phosphates, nitrates...) qui n'est pas écologiquement souhaitable.

Les Amphibiens

Normalement lorsqu'il existe une métapopulation locale (ensemble de population étant en contact reproductif) et qu'il n'y pas de barrière infranchissable, les Amphibiens colonisent spontanément les zones humides. Cependant, ce groupe est l'un de ceux où les spécialistes admettent des déplacements :

- 1) pour les espèces les plus communes qui ne parviendraient pas à coloniser le site alors qu'il est favorable ; exemple : le Crapaud commun (*Bufo bufo*).
- 2) pour des espèces moins communes, dans le cas de mesures compensatoires au projet ; exemple : reconstitution d'un site favorable au Crapaud calamite (*Bufo calamita*), avec transplantation de l'espèce, si la carrière a été amenée à détruire un site de reproduction.

Photo 66. Le Crapaud calamite (*Bufo calamita*) (M. Pajard).



4.10. Les équipements destinés au public

Lorsque le site doit être ouvert au public, un certain nombre d'équipements et dispositifs doivent être mis en place. On a vu au chapitre précédent, relevant de la conception du site les grands principes à adopter pour concilier la fréquentation d'un site et sa valeur écologique. On ne traitera ici que d'un certain nombre d'équipements qui relèvent de la finition du site plutôt que de sa conception.

4.10.1. LA ZONE D'ACCUEIL

Tout site ouvert au public, même si l'accès est limité, doit comporter un point d'entrée, permettant l'accueil du public. Les équipements de base sont les suivants :

- un parking, même rustique ;
- un panneau indiquant qu'il s'agit d'une zone naturelle (avec le nom des promoteurs du projet) ;
- des poubelles (en dehors de la zone d'accueil, les poubelles ne sont pas conseillées sur le site, où elles génèrent un problème de gestion : on préfère des panneaux visant à responsabiliser le public en lui demandant de conserver ses ordures).

Pour un site plus sophistiqué on pourra adjoindre :

- des sanitaires ;
- des bancs et une zone pique-nique, ombragés de préférence ;
- un plan du site et plusieurs panneaux explicatifs.

Dans les sites les plus ambitieux, on trouvera même une maison d'accueil. L'arrivée sur le parking par une porte monumentale (comme on le voit souvent aux États-Unis) est un signal fort, indiquant clairement qu'on entre dans un espace particulier.

4.10.2. LES CHEMINEMENTS

Les cheminements au sein d'un site écologique ouvert au public, même de manière restreinte, sont essentiels. Ils doivent permettre aux visiteurs d'être satisfaits de leur visite, et d'avoir le sentiment d'avoir vu l'essentiel. Ils doivent par ailleurs organiser les circulations de façon à préserver les secteurs sensibles. On a vu au chapitre précédent qu'une partie d'organisation des cheminements relevait de la conception. Cependant au moment des travaux, la question concrète « quel type de chemin ? » se pose.

Trois grands types de chemins.

⇒ le chemin tout public revêtu et bien entretenu (goudronné, gravillonné)

L'expérience des sites totalement ouverts au public montre qu'environ 80 % du public ne quitte pas ce type de chemin, soit par peur de se salir, soit par discipline, soit par appréhension vis-à-vis des milieux plus « sauvages ». Ces chemins revêtus doivent toutefois permettre d'accéder à quelques milieux et points de vue d'intérêt. Ils doivent par ailleurs être accessibles aux personnes handicapées (pas d'escaliers ou de pentes

Photo 67. Exemple de sentier de découverte (Écosphère – M. Pajard).



Photo 68. Il est souhaitable d'aménager une zone d'accueil dans les sites ouverts au public (Écosphère – M. Pajard).



Photo 69. Aménagement d'un cheminement en zone humide avec pilotis et platelage (Écosphère – M. Pajard).

trop raides). Un certain nombre de ces chemins ont également un rôle d'accès pour les engins de gestion du site.

⇒ le sentier de découverte

Le sentier de découverte est un chemin de type praticable, stabilisé et entretenu. Un aspect plus naturel peut lui être donné au moyen d'une couverture herbeuse maintenue par une fauche 2 à 3 fois/an. Il peut aussi être plus étroit et ressembler à un petit sentier. Destiné à un public qui veut bien comprendre le site, mais ne veut pas risquer de se perdre, ce type de chemin est

balisé environ tous les 200 m. On pourra organiser une mise en scène : passerelles, points de vue, observatoires...

⇒ le sentier difficilement praticable

Ce type de chemin est destiné au personnel d'entretien à pied ou à des visiteurs aventuriers qui ne seront en général pas très nombreux. Ce type de sentier est difficile d'accès sans chaussures de marche ou sans bottes.

Les cheminements particuliers

Dans les zones marécageuses instables ou fragiles, on pourra utiliser :

- des caillebotis posés à même le sol si celui-ci a une portance suffisante ;
- divers types de pontons sur pilotis ou pieux enfoncés dans le sol ; ce dernier système permet de franchir des secteurs en eau.

les ponts-levis

Des systèmes de pont-levis ont été mis en place sur certains sites afin de limiter l'accès lors de certaines époques sensibles ou à l'occasion de travaux d'entretien.

4.10.3. LES ÉQUIPEMENTS D'INTERPRÉTATION DU SITE

Les équipements d'interprétation du site sont essentiellement constitués de panneaux donnant des informations le long d'un sentier balisé, appelé sentier d'interprétation. L'objectif est en même temps d'informer et d'éduquer au respect de l'environnement naturel. On ne peut donner ici de recettes tant il y a de cas différents. On retiendra cependant quelques conseils tirés d'expériences concrètes dans ce domaine.



PLANCHE VIII. (M. Courcoux). Aménagement d'un affût ornithologique camouflé dans la végétation.

Conseils concernant le contenu

- 1) savoir à qui l'on s'adresse (accès limité à des connaisseurs naturalistes, groupes guidés, scolaires, tout public) ;
- 2) expliquer brièvement le pourquoi et la genèse du site ; présenter les différents partenaires et insister sur l'intégration locale du site ;
- 3) répondre à des questions concrètes que les gens risquent de se poser à l'endroit précis ou est disposé le panneau explicatif ;
- 4) illustrer et faire des textes concis, sans tomber cependant dans le slogan publicitaire ;
- 5) éviter les cours théoriques, mais ne pas tomber dans le simplisme : faire passer quelques messages et quelques notions d'écologie particulièrement en rapport avec le site ;
- 6) éviter les erreurs scientifiques qui seront inévitablement corrigées par certains et discréditeront les concepteurs.

Conseils concernant le support

On préférera du matériel rustique s'insérant bien dans le contexte naturel et robuste, c'est à dire résistant aux intempéries et au vandalisme. Dans le cas d'un site à ouverture restreinte au public (entrée payante, visites encadrées...), on peut s'orienter vers un aménagement très léger avec des repères numérotés ou codés et une brochure d'accompagnement.

4.10.4. LES ÉQUIPEMENTS D'OBSERVATION

Les lieux d'observation sont bien entendu essentiels. C'est au niveau de la conception qu'on les localisera en fonction du tracé des cheminements, des milieux et de la faune à observer.

La mise en place des équipements d'observation dépend beaucoup du risque de dérangement. D'une façon générale, il faut éviter les promontoires découverts permettant une vision globale du site car ils font fuir une partie de la faune. Les accès aux lieux d'observation, doivent être traités (en ce qui concerne le dérangement) avec autant d'attention que les équipements eux-mêmes.

Les pontons et plates-formes d'observation

Ces équipements sont construits comme les chemins en caillebotis ou sur pilotis. Des rambardes assureront une meilleure sécurité et pourront servir de support à des petits panneaux explicatifs. Ces équipe-

ments sont particulièrement adaptés pour faire découvrir la vie des milieux aquatiques ou marécageux de petite taille où la question du dérangement ne se pose pas : zones d'intérêt floristique par exemple.

Les miradors

Dans des zones palustres où la végétation est assez haute, et si le sol est suffisamment stable, on peut envisager l'installation de miradors.

Les observatoires ornithologiques

Les observatoires ornithologiques sont destinés à l'observation au plus près possible de l'avifaune. Compte tenu qu'ils doivent être construits avec soin (fondations solides entre autres) et particulièrement bien intégrés à l'environnement, ces équipements peuvent être assez onéreux. Quelques conseils pratiques :

- 1) Afin de préserver la tranquillité des oiseaux, un observatoire doit être positionné de façon discrète, même si cela doit réduire le champ de vision.
- 2) On doit penser aux effets de contre-jour déplaçants pour les observateurs ; a priori la meilleure exposition relativement à l'éclairage est le Nord ; on peut d'ailleurs réaliser des observatoires à multiplans avec des orientations allant du Nord-Est au Nord-Ouest ; cependant, on peut également multiplier les observatoires afin de permettre une vision d'un même lieu sous différents angles.
- 3) Compte tenu de la diversité des âges et des tailles des possibles publics, il est utile de prévoir des fenêtres d'observation à différentes hauteurs ; on peut également prévoir un poste d'observation aménagé pour les chaises roulantes des handicapés physiques.
- 4) Le bruit étant un facteur limitant l'observation des oiseaux, il faut insister sur l'intérêt qu'il y a à être silencieux dans ces abris. ■

ENVISAGER L'APRES-CARRIERE

Mode d'entretien des habitats naturels

Quelle que soit la capacité d'un écosystème convenablement conçu à s'autogérer, on constate qu'en pratique, rares sont ceux qui ne nécessitent pas d'interventions sur la végétation. Chaque fois que possible, on prévoira des solutions se rapprochant du rajeunissement naturel des milieux (inondations, crues dynamiques, brûlage...). Ces solutions n'étant pas toujours faciles à mettre en pratique, surtout sur de petits sites, les solutions plus dirigistes doivent également être présentées : désherbage (de préférence non chimique), faucardage, coupes, curages...

Gestion des prairies et boisements

Pour les prairies, qui sont entretenues par définition, on prévoira le mode de gestion le plus favorable : fauche, pâturage semi-intensif, extensif, prairies mixtes. Un mode d'exploitation sylvicole extensif peut faire partie des mesures écologiques et des objectifs à atteindre.

Qui va entretenir et gérer ?

Le réalisme dans l'entretien et la gestion préconisés doit être la règle. On aborde là une des questions-clefs de la réussite du projet. Les expériences accumulées dans la création ou la restauration de zones humides, qu'il s'agisse de non de carrière, montrent que le défaut d'entretien adéquat est une des causes majeures d'échec. Il faut donc envisager les personnes qui peuvent entretenir le site. Si l'initiative en ce domaine reste totalement aux mains de propriétaires privés, on se retrouve face à l'impossibilité de garantir l'avenir. Mieux vaut dans ces conditions en rester à des considérations générales sur l'entretien souhaitable.

Cependant des solutions plus aptes à permettre un entretien adapté peuvent être proposées en faisant appel par exemple : au personnel communal ayant reçu quelques jours de formation afin de s'imprégner des objectifs du site, aux conservatoires régionaux des espaces naturels (CREN), aux associations locales, à des ONG, à des fondations...

Le suivi scientifique

Un suivi de la zone humide est souvent souhaitable. D'abord c'est la seule façon de statuer sur la réussite du projet en fonction des critères retenus à l'origine. Ensuite c'est une source de connaissance pour l'ingénierie écologique qui manque de résultats scientifiques.

Les réorientations en cours de route

L'ingénierie écologique est une science appliquée récente, qui de surcroît s'appuie sur une science jeune, l'écologie. En conséquence, malgré toutes les précautions prises, la marge d'erreur y est importante. De ce fait, il est utile de pouvoir réorienter la zone humide en cours de route : il va par exemple s'agir de modifier en partie le bilan hydrique ou la qualité des eaux en supprimant certains écoulements, de limiter la croissance de végétaux trop envahissants, de reprofiler certains substrats, etc. Si la nature des interventions ne peut par définition être définie à l'avance (encore qu'on puisse anticiper la probabilité de certains défauts), il faut prévoir si cela sera possible.

Les critères d'évaluation du projet

Qui dit "objectif" dit capacité à évaluer la réussite ultérieure. Ce point apparaît de plus en plus important à mesure que l'expérience progresse en matière de création de zones humides. D'une part, le monde naturaliste et scientifique a besoin de points de repère pour éclairer le débat sur le rôle et l'utilité de la création des zones humides. D'autre part, les techniques d'ingénierie écologique, depuis la conception jusqu'aux travaux, a besoin de valider, de critiquer ou de corriger le travail qu'elle met en œuvre, ce qui ne peut se faire que sur des bases d'évaluation des résultats.

Donc, il est conseillé de fixer à l'avance des critères d'évaluation du projet. Bien sûr, une certaine souplesse est requise et il ne faut pas raisonner en termes manichéens, échec ou réussite. Les succès partiels (qui sont fréquents) doivent être envisagés. Dans l'idéal, il faudrait se fixer des critères de réussite à court, moyen et long terme, car on connaît de nombreux exemples de succès éphémères mis à mal par la colonisation végétale, l'eutrophisation des eaux, les perturbations inattendues, etc. Les critères d'évaluation du projet ne sont pas à confondre avec les objectifs eux-mêmes. Quelle que soit la nature de l'objectif final, qu'il soit exprimé en termes d'espèces, d'habitats ou de fonctionnement, les critères d'évaluation devront prendre en compte ces trois aspects. Si par exemple l'objectif est la nidification de la Sterne pierregarin, les critères d'évaluation prendront en compte : (1) l'aspect spécifique : nombre de couples nichant, évolution des effectifs, etc., (2) l'aspect habitat : les îlots sont-ils convenables ? (3) l'aspect fonctionnel : les îlots sont-ils durables ?

5

Aménagement et entretien d'habitats

5.1 LES HABITATS AQUATIQUES DES PLANS D'EAU	112
5.2 LES VASIÈRES ET LES GRÈVES	119
5.3 LES FOSSÉS ET LES CHENAUX	123
5.4 LES CEINTURES DE BERGES	128
5.5 LES ROSELIÈRES À PHRAGMITE COMMUN (<i>PHRAGMITES</i> <i>AUSTRALIS</i>) OU PHRAGMITAIES	133
5.6 LES PRAIRIES	143
5.7 LES MARES	149
5.8 LES ÎLES ET LES RADEAUX	155
5.9 LES FRONTS DE TAILLE ET MICROFALAISES	162
5.10 LES PELOUSES ET LES LANDES SABLO-CAILLOUTEUSES DE TYPE "STEPPIQUE"	164
5.11 LES HAIES ET BANDES BOISÉES	167
5.12 LES BOISEMENTS	171

L'ingénierie écologique – c'est à dire l'intervention à but naturaliste sur les écosystèmes – balance sans cesse entre deux pôles lorsqu'il s'agit de définir des actions précises et concrètes sur les sites : d'un côté on est tenté de laisser agir les forces spontanées de la "nature", dans l'espoir qu'elles parviendront finalement à s'équilibrer pour le meilleur profit de la biodiversité, d'un autre côté force est de constater que dans les paysages tellement façonnés par l'Homme dans lesquels on vit, un laisser-faire total n'est pas la meilleure façon de remplir des objectifs de nature écologique. L'aménagement à vocation naturelle des carrières en eau n'échappe naturellement pas à ce débat.

Ce contexte étant rappelé, on peut concevoir de façon pragmatique quantité de **stratégies d'aménagement**. En dehors du laisser-faire total, les différences de stratégie tiennent à la nature et au degré des interventions suivantes :

- ⇒ **travaux de terrassement et de connexions hydriques**, pouvant être plus ou moins inspirés de milieux et de fonctionnements naturels environnants ou au contraire totalement originaux vis-à-vis de ceux-ci ;
- ⇒ **végétalisation, plantations** - et exceptionnellement introductions animales - servant seulement à initier des successions naturelles ou visant de manière plus dirigiste la mise en place de biocénoses particulières ;
- ⇒ **gestion et entretien** ultérieurs qui peuvent avoir pour objet soit de corriger les effets indésirables de la dynamique naturelle, soit de pérenniser activement des milieux qui disparaîtraient sans intervention.

Dans ce chapitre, on aborde la création sur carrière de 12 types de milieux. Le canevas global de présentation est globalement le même :

- ⇒ définition des milieux et principales données écologiques à prendre en compte
- ⇒ rappel de l'intérêt biologique sous l'angle patrimonial (accueil d'espèces remarquables)
- ⇒ modalités particulières de création sur carrières, les aspects généraux ayant été traités au chapitre précédent
- ⇒ modalités de végétalisation, s'il y a lieu
- ⇒ gestion et entretien.

5.1. Les habitats aquatiques des plans d'eau

Les plans d'eau du type lac ou étang sont naturellement rares en plaine, plus fréquents en montagne, compte tenu du relief et des phénomènes géomorphologiques (moraines, glissements de terrain...). Les zones littorales planes présentent aussi de vastes étendues d'eau, le plus souvent salées ou saumâtres. En plaine, c'était les bras morts des fleuves qui fournissaient naturellement le plus de plans d'eau, ceux-ci de tailles modestes et de profondeurs généralement modérées. La pisciculture (Brenne, Dombes, Sologne...) a enrichi en son temps les zones de plaine en étangs semi-naturels, mais l'ouverture de nombreux plans d'eau par l'exploitation des sables et graviers alluvionnaires, restera sans doute l'une des évolutions écologiques marquantes de notre époque. Les vastes surfaces aquatiques de Poses vers Rouen, de Miribel-Jonage à côté de Lyon ou de Villeneuve-Tolosane près de Toulouse n'ont pas d'équivalent naturel dans notre pays. Ces espaces aquatiques s'intègrent progressivement à l'environnement en remplissant différentes fonctions (de loisirs en particulier).

Proposition de différenciation entre un lac et un étang⁽²⁶⁾

LAC	ÉTANG
Étendue d'eau dormante intérieure qui possède, en plus de sa zone littorale, une zone profonde privée de lumière où les espèces végétales ne peuvent se développer. Dans la plupart des cas, la lumière ne pénètre pas à plus de 10 m de profondeur.	Étendue d'eau dormante intérieure qui ne possède pas de zone profonde, mais dont le fond est parfois soustrait à l'action thermique du soleil. La profondeur moyenne se situe entre 1 et 3 m. Le développement des végétaux est partout possible.

⁽²⁶⁾ d'après MULHAUSER B. & MONNIER G. – *Guide de la faune et de la flore des lacs et des étangs d'Europe*. Delachaux et Niestlé. 1995.

5.1.1. DÉFINITIONS ET DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'AMÉNAGEMENT DES HABITATS AQUATIQUES

En dehors de la superficie (nous ne traitons pas dans ce chapitre des mares ou des fossés qui sont abordés dans des chapitres spéciaux), le paramètre clef d'un plan d'eau est la présence ou non d'une zone profonde. Ce facteur tient le plus souvent lieu de ligne de démarcation entre les termes difficiles à définir de « lac » et d'« étang ».

La profondeur entraîne une série de conséquences importantes :

- l'abondance de la couverture végétale, qui tient pour beaucoup à la profondeur, est par exemple un paramètre essentiel dans la distinction des habitats aquatiques ; de nombreux oiseaux d'eau apprécient, comme milieu complémentaire, des zones d'eau libre, en particulier au sein de massifs de roselières.
- la profondeur joue un rôle indirect sur les biocénoses : plus la masse d'eau d'un plan d'eau est importante, plus ce dernier amortit les variations de certains paramètres (température, pH...) ; c'est ce qu'on appelle « l'effet tampon ».
- à partir de quelques mètres de profondeur (les phénomènes peuvent commencer à partir de 3 m), un plan d'eau connaît une stratification thermique variable selon les saisons : en été, les eaux de surface se réchauffent et sont mélangées par le vent ; lorsqu'en automne, les températures diminuent, les eaux de surface s'enfoncent et le plan d'eau connaît un mélange de ses eaux et une homogénéisation de la température.

L'intérêt écologique des habitats aquatiques profonds (plus de 2 m)

Même si du point de vue de la biodiversité et de la productivité, les zones aquatiques profondes (au-dessous de 2 m) sont les moins riches, elles n'en présentent pas moins divers intérêts. Une profondeur supérieure à 2 m entraîne l'absence de végétaux enracinés et permet la constitution d'espaces aquatiques ouverts. Parmi les avantages de disposer d'eaux profondes, on pourra citer les éléments suivants :

- elles stabilisent l'ensemble du plan d'eau et des zones riveraines vis-à-vis de nombreux paramètres (pH, température, dilution des nutriments et polluants...) ; l'ensemble de la zone humide se trouve moins fragile et plus apte à subir des variations venant de l'extérieur (effet tampon).

Rôle des étendues d'eau dégagées pour les Oiseaux d'eau

Les étendues d'eau suffisamment grandes et dégagées jouent un grand rôle dans la biologie en particulier des Anatidés.

- 1) lieux de remise où de grands rassemblements d'oiseaux peuvent se sentir en sécurité durant l'hivernage.
- 2) repos, sommeil durant la journée
- 3) toilette et mue (de l'été au début de l'hiver)
- 4) activités sociales : cohésion des groupes, échange d'informations, formation de couples...
- 5) alimentation pour les canards plongeurs (Fuligules...) ou les oiseaux piscivores (Grèbes, Cormorans...).

- les fonds des plans d'eau, où ne parvient pas la lumière, sont très pauvres en oxygène ; des bactéries spécialisées y transforment les nitrates en azote gazeux, contribuant ainsi à la dépollution des eaux.

L'intérêt écologique des habitats aquatiques ouverts

Les grandes étendues d'eau permettent des rassemblements d'oiseaux d'eau parfois importants, particulièrement en hivernage et en passages migratoires. Par ailleurs, certaines espèces comme les hirondelles chassent en rase-mottes au-dessus des plans d'eau.

L'intérêt écologique des habitats aquatiques peu profonds (moins de 2 m)

Les habitats aquatiques peu profonds sont tout d'abord constitués des herbiers qui s'y développent, avec des espèces flottantes ou enracinées. Les grandes espèces végétales (macrophytes) servent à leur tour de substrat à de nombreuses autres espèces microscopiques.

Photo 70. Les milieux aquatiques peu profonds sont colonisés par des espèces aquatiques flottantes ou enracinées et par des espèces dont seules les parties basses sont immergées (hélrophytes) (Écosphère – M. Pajard).



Les macrophytes peuvent être enracinés (émergés, submergés ou à feuilles flottantes) ou flotter librement. Les facteurs influençant le plus le type et la densité des macrophytes sont les suivants.

- la profondeur et la luminosité (donc la turbidité) : la densité des macrophytes décroît avec la luminosité.
- les courants ainsi que la hauteur des vagues, peu favorables aux macrophytes.
- la teneur en éléments nutritifs (N, P), favorable aux macrophytes à condition qu'elle ne conduise pas à une eutrophisation excessive (auquel cas seules quelques espèces se maintiennent).
- le substrat du fond, les sols argilo-limoneux étant plus favorables aux macrophytes que le sable ou les graviers.
- la densité en faune herbivore (avec par exemple des destructions importantes quand il s'agit du ragondin ou du rat musqué).

Citons les principaux intérêts des herbiers aquatiques.

- stabilisation du substrat (espèces enracinées).
- diminution de la remise en suspension des sédiments et donc de la turbidité.
- absorption de la houle (grandes feuilles flottantes).
- importante source d'oxygène gazeux dissous.
- support physique pour des algues.
- base de la chaîne alimentaire (en particulier source majeure de détritus pour le benthos et les décomposeurs).
- habitat principal des invertébrés aquatiques (insectes aquatiques ou à larves aquatiques, crustacés, mollusques...).
- abri pour les poissons et leurs alevins.
- source de nourriture pour de nombreuses espèces : Odonates, Poissons, Amphibiens, Cistude d'Europe (tortue aquatique), Oiseaux d'eau (grèbes, hérons, anatidés...), Campagnol aquatique...

5.1.2. LE RÔLE DES HABITATS AQUATIQUES DANS LA BIODIVERSITÉ

Pour les invertébrés, les eaux très riches (eutrophisées) sont très productives en biomasse mais abritent peu d'espèces (vers plats, vers du genre *Tubifex*, larves de Chironomes). Les eaux assez pauvres produisent peu de biomasse et sont, elles aussi, pauvres en espèces, même si certaines sont d'intérêt comme les



TABLEAU XV. – Exemples de macro-invertébrés aquatiques.

Nom scientifique	Nom français	Classification
ESPÈCES DES EAUX PROFONDES OU NON		
<i>Hydra vulgaris</i>	Hydre commune	Cnidaire
<i>Cholorohydra viridissimus</i>	Hydre verte	Cnidaire
<i>Spongilla lacustris</i>	Eponge lacustre	Spongiaire
"Turbellariés"	Verts plats - Planaires	Plathelminthes
"Rotateurs"	Rotifères	Némathelminthes
<i>Lymnaea stagnalis</i>	Limnée des eaux stagnantes	Gastéropodes
<i>Planorbis planorbis</i>	Planorbe commun	Gastéropodes
<i>Anodonta cygnaea</i>	Anodonte des cygnes	Bivalves
<i>Sphaerium corneum</i>	Cyclade cornée	Bivalves
"Hirudiniés"	Sangsues	Achètes
"Hydracariens"	Hydracariens	Acariens
"Cladocères"	Daphnées	Crustacés
"Copépodes"	Cyclops & co	Crustacés
<i>Asellus aquaticus</i>	Aselle aquatique	Crustacés
"Isopodes"	Isopodes	Crustacés
Epheméroptères	larves d'Epheméroptères	Insectes
Phryganes	larves de Phryganes	Insectes
<i>Gerris</i> sp.	Gerris	Insectes
<i>Notonecta</i> sp.	Notonecte	Insectes
"Naucoridés"	Naucores	Insectes
ESPÈCES DES EAUX PEU PROFONDES		
<i>Physa acuta</i>	Physe aigue	Gastéropodes
<i>Stagnicola palustris</i>	Limnée des marais	Gastéropodes
<i>Radix auricularia</i>	Limnée auriculaire	Gastéropodes
<i>Radix peregra</i>	Limnée voyageuse	Gastéropodes
<i>Planorbis corneus</i>	Planorbe rouge	Gastéropodes
<i>Argyroneta aquatica</i>	Argyronète	Arachnides
<i>Gammarus pulex</i>	Gammare	Crustacés
Trichoptères	Trichoptères	Insectes
<i>Nepa cinerea</i>	Nèpe cendrée	Insectes
<i>Ranatra linearis</i>	Ranâtre	Insectes
Gyrinidés	Gyrins	Insectes
Hydrophilidés	Hydrophiles	Insectes
Lépidoptères	larves de Papillons	Insectes

écrevisses. En revanche les eaux productives sans excès et alcalines ont une très forte biodiversité en invertébrés. Certains vivent dans les eaux profondes ou non, d'autres ne vivent que dans les eaux peu profondes.

En ce qui concerne les vertébrés, les milieux aquatiques sont utilisés par les poissons bien sûr, mais aussi par la Cistude d'Europe, tortue aquatique remarquable ou des mammifères peu communs comme la Loutre, la Musaraigne aquatique, le Castor... Une espèce comme le Vespertilion de Daubenton, chauve-souris de grande valeur patrimoniale (Protégée nationale et Liste Rouge), se nourrit de mouches, d'alevins, de crustacés... au niveau des plans d'eau ouverts.

Quelques espèces d'oiseaux peuvent construire leur nid dans la végétation aquatique. C'est le cas d'espèces communes comme la Foulque macroule (*Fulica atra*) ou la Poule d'eau (*Gallinula chloropus*) et d'espèces moins communes comme la Mouette rieuse (*Larus ridibundus*). Deux espèces pour lesquelles les gravières jouent un rôle de milieu de substitution important, sont également dans ce cas : le Grèbe huppé (*Podiceps cristatus*) nicheur assez rare en France et le Grèbe castagneux (*Tachybaptus ruficollis*) nicheur rare en France.

Les herbiers aquatiques peuvent héberger par ailleurs des végétaux remarquables comme l'Utrriculaire commune (*Utricularia vulgaris*), l'Hottonie des marais (*Hottonia palustris*), la grande et la petite Naiade (*Najas marina*, *N. minor*), le Nénuphar blanc (*Nymphaea alba*), la Ruppie maritime (*Ruppia maritima*), la Vallisnérie (*Vallisneria spiralis*), la Zannichélie des marais (*Zannichellia palustris*)...

Photo 71. Colonie de mouette rieuse (*Larus ridibundus*) nichant dans la végétation aquatique (Écosphère – M. Pajard).

5.1.3. L'AMÉNAGEMENT DES HABITATS AQUATIQUES SUR CARRIÈRES

Les questions relatives à la superficie et au nombre de plans d'eau ainsi qu'au profilage des berges ont été abordées dans les chapitres relatifs à la conception et aux travaux. Rappelons par ailleurs que la connaissance de la nature des eaux est un élément essentiel lors de la création d'habitats aquatiques (oxygénation des eaux, teneur en éléments nutritifs, pH, turbidité, sources de pollution...).

Nous aborderons ici trois aspects particuliers de la création des habitats aquatiques :

- 1) les habitats aquatiques avec pour objectif principal l'accueil des oiseaux d'eau,
- 2) les habitats aquatiques aux eaux pauvres à assez pauvres en éléments nutritifs (Azote, Phosphore...).
- 3) les fonctions écologiques des habitats aquatiques en plaine alluviale selon la nature des types de connexions hydriques avec le cours d'eau.

Attirer les oiseaux d'eau

Lorsque le but visé est avant tout d'attirer les oiseaux d'eau et particulièrement les Anatidés, quelques conseils peuvent être donnés :

- 1) la productivité de l'étang doit être bonne et en particulier la densité d'invertébrés aquatiques (chironomes...) doit être forte lors de l'éclosion des jeunes ; dans ce cas, on pourra donc mettre environ 0,3 m de terre végétale sur les hauts-fonds de berges ; l'épandage de paille est aussi possible (en ne dépassant pas

10 t/ha), celle-ci s'imbibant d'eau, elle coule au fond où elle libère des matières organiques assimilables ; il faut toujours cependant éviter l'eutrophisation excessive des eaux qui finit par induire un déficit en oxygène et en définitive une baisse de la productivité. En conséquence, on pourra régaler la terre végétale ou pratiquer le paillage sur des surfaces limitées ; l'emploi d'engrais, même organiques (fumier, lisier, purin...) est vivement déconseillé, en particulier pour des risques de pollution des eaux superficielles et souterraines.

- 2) il est bon de prévoir de nombreuses zones d'eaux peu profondes riches en plantes aquatiques : une profondeur de 0,3 m convient bien aux canards de surface, tandis que les canards plongeurs apprécient des profondeurs de l'ordre de 1 m et plus.
- 3) pour attirer les oiseaux migrateurs et hivernants, il faut leur assurer une sensation de sécurité, à savoir (1) des surfaces découvertes suffisamment grandes pour qu'ils puissent se trouver toujours assez loin des rives (une distance d'au moins 100 m peut être conseillée) et de la fréquentation humaine (surtout s'il s'agit de chasseurs), (2) des berges dégagées d'arbres afin d'assurer une visibilité suffisante.

- 4) en période internuptiale, les oiseaux d'eau passent la journée sur les grands plans d'eau (remise), puis partent la nuit à la recherche de nourriture (gagnage) parcourant parfois 10 à 20 km ; s'ils peuvent s'alimenter sur le site (prairies humides, vasières...), ils pourront économiser des forces.

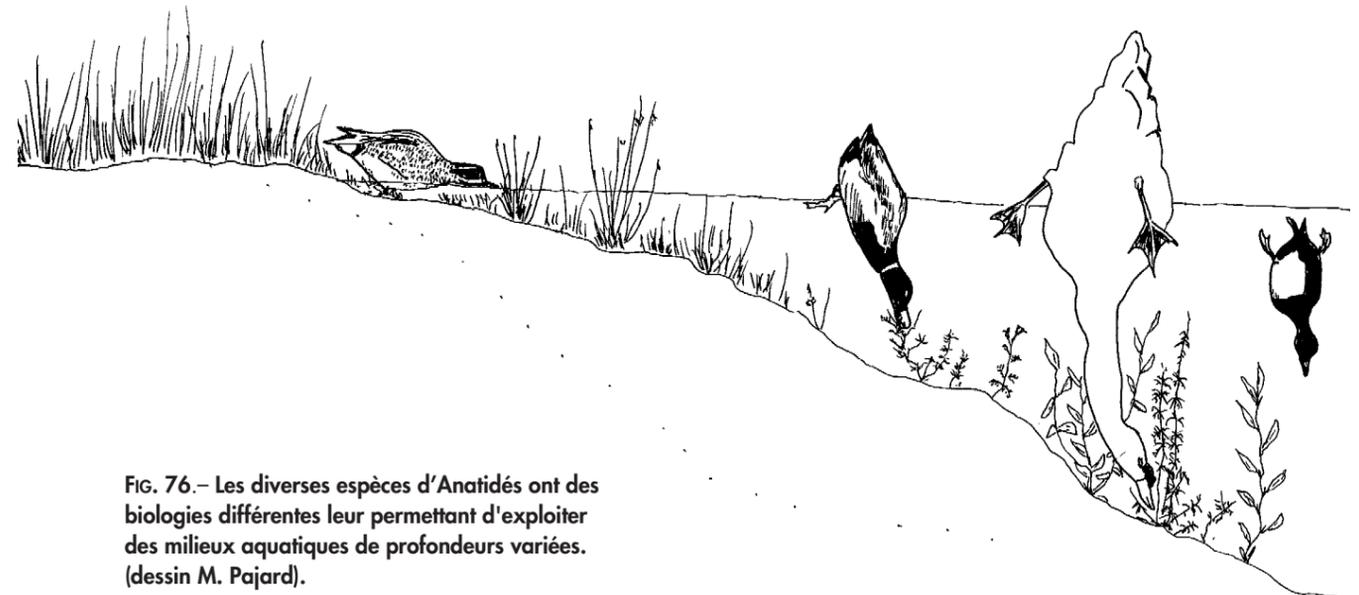


FIG. 76. – Les diverses espèces d'Anatidés ont des biologies différentes leur permettant d'exploiter des milieux aquatiques de profondeurs variées. (dessin M. Pajard).



Photo 72.

Aménagements destinés aux oiseaux d'eau : hauts-fonds, vasières et îlots au sein d'un plan d'eau de gravière CNC - C.A.E. (Université de Bourgogne).

TABLEAU XVI. – Fonctionnement écologique des gravières selon leur type de connexion au cours d'eau. (inspiré de MICHELOT J.-L. – *Gestion patrimoniale des milieux naturels fluviaux*, 1995 – Réserves Naturelles de France).

	gravière isolée	gravière régulièrement inondée	gravière connectée à l'aval	gravière connectée à l'amont et à l'aval
FONCTIONNEMENT				
Qualité des eaux de la gravière par rapport à celles du fleuve	largement indifférente	largement indifférente sauf inondation par débordement des digues du fleuve	meilleure en cas de pollution du fleuve	identique mais possibilité d'auto-épuration de la gravière
Exportation de matières organiques produites dans la gravière	aucune	très faible	oui	oui
Colmatage de la gravière	assez rapide sur gravière eutrophe	variable selon l'énergie des crues	assez lent	très lent
Refuge en cas de stress hydrique ou de pollution	non	éventuellement	oui	oui en particulier, si possibilité de fermer à l'amont
Réalimentation de la nappe	non	variable (la gravière capte un volume d'eau qu'elle restituera lors de la décrue)	non si la gravière draine la nappe	non si la gravière draine la nappe
Frai des poissons du fleuve	non	oui	oui	oui

Le cas des eaux peu riches

Lorsque les eaux alimentant le plan d'eau sont naturellement peu riches (oligotrophes, mésotrophes), il n'est pas souhaitable de les enrichir pour attirer les Anatidés. Il existe en effet dans ce cas d'autres intérêts naturalistes, liés justement à la pauvreté des eaux. Citons par exemple :

- le développement d'espèces végétales aquatiques, les plus remarquables d'entre elles ne supportant souvent pas des eaux eutrophes ;
- l'accueil d'Amphibiens ou d'Odonates.

Fonctionnement du milieu aquatique et connexions hydrauliques en plaine alluviale

La création des habitats aquatiques peut être liée, sur des gravières en lit majeur, à des connexions hydrauliques avec le cours d'eau. La gravière joue alors le rôle d'une annexe fluviale. Les fonctions écologiques qu'elle remplit dépendent alors du type de connexion mise en place. Le tableau XVI montre les avantages de telles connexions, en les comparant avec la gravière isolée.

(28) Sauf en cas de mise en œuvre de programmes de réintroduction conçus et suivis par des autorités scientifiques compétentes, après obtention des autorisations nécessaires (détermination et transfert d'espèces protégées).

5.1.4. LA VÉGÉTALISATION DES HABITATS AQUATIQUES

Compte tenu de la bonne capacité de dispersion des végétaux aquatiques en général, l'introduction ne se justifie qu'en cas d'isolement hydrique du site. Il existe alors différentes techniques :

- ⇒ introduire de la terre ou de l'eau provenant d'un autre site, auquel cas on ne contrôle pas la composition floristique ;
- ⇒ introduire des spécimens ; une technique efficace pour les végétaux enracinés consiste à jeter dans l'eau des plantes aux racines enveloppées dans de la terre et lestées : touffe lestée, panier lesté ;

TABLEAU XVII. – Mélange classique d'espèces* pour végétaliser des habitats aquatiques calmes et peu profonds (maximum 2 m) (eaux mésotrophes à eutrophes).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
Nénuphar jaune	<i>Nuphar lutea</i>	racines nues	plantation, panier lesté, touffe lestée
Nénuphar blanc	<i>Nymphaea alba</i>	racines nues	plantation, panier lesté, touffe lestée
Potamo crépu	<i>Potamogeton crispus</i>	fragments, racines nues	plantation, touffe lestée
Potamo nageant	<i>Potamogeton natans</i>	fragments, racines nues	plantation, touffe lestée
Myriophylles	<i>Myriophyllum spicatum</i> <i>M. verticillatum</i>	fragments	plantation, touffe lestée
Cornifles	<i>Ceratophyllum demersum</i> <i>Ceratophyllum submersum</i>	fragments	touffe lestée
Renouée amphibie	<i>Polygonum amphibium</i>	godets, fragments, racines nues	touffe lestée
Renoncule aquatique	<i>Ranunculus aquatilis</i>	fragments	touffe lestée, plantation

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

⇒ introduire des fragments (touffes, brins) ou des boutures ;

⇒ utiliser des plants ou des godets vendus dans le commerce (on préférera alors des établissements garantissant des écotypes locaux).

La meilleure saison pour l'introduction est le printemps, lors de la période de croissance maximale. On devra tout particulièrement veiller à ne pas introduire d'espèces exotiques envahissantes.

5.1.5. L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ANIMALES EN MILIEU AQUATIQUE

L'introduction d'espèces animales n'est jamais très recommandée. Cependant, on peut l'envisager pour les habitats aquatiques lorsque ceux-ci sont isolés de sources naturelles. On pourra alors introduire des poissons ou des amphibiens en veillant :

- 1) à n'utiliser que des espèces indigènes ;
- 2) à ne pas introduire d'espèces rares⁽²⁸⁾.

5.1.6. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES HABITATS AQUATIQUES

Les avantages de l'entretien des habitats aquatiques

Une gestion modérée et équilibrée des milieux aquatiques, destinée à contenir le développement des végétaux, est souvent nécessaire et ceci pour différentes raisons :

- 1) l'évolution naturelle d'un milieu aquatique est l'atterrissement, c'est à dire que le plan d'eau se comble inéluctablement par accumulation de sédiments et de végétaux morts ; cette évolution est rapide dans les milieux riches mais peut être très lente dans les milieux pauvres.

- 2) dans les milieux aquatiques non gérés, il arrive qu'une espèce domine la végétation, parfois jusqu'à créer des peuplements monospécifiques (cas des lentilles d'eau par exemple).
- 3) un équilibre entre des milieux fortement végétalisés et des espaces ouverts est favorable à de nombreuses espèces, en particulier aux poissons et aux oiseaux d'eau.

Les méthodes d'entretien destinées à limiter la prolifération des végétaux aquatiques

⇒ l'arrachage

Lorsque la profondeur le permet et que l'on peut disposer de personnel, une des meilleures façons de limiter la progression des plantes aquatiques vers les eaux ouvertes est l'arrachage pur et simple des appareils racinaires. Ceci doit être pratiqué manuellement. Dans ce cas, on peut arracher sélectivement les végétaux, en conservant par exemple les espèces rares ou en n'éliminant que les espèces indésirables. Une technique efficace consiste à creuser des fossés autour des zones à traiter – en les divisant en carrés par exemple – puis à cisailer l'ensemble à la base à l'aide de fils métalliques. Si des systèmes de gestion des niveaux d'eau existent, on pourra assécher la zone et employer des moyens mécaniques. Ces méthodes présentent cependant des inconvénients : remise en suspension de sédiments augmentant la turbidité, remise en suspension de matières organiques augmentant la richesse nutritive (on aura intérêt à exporter les végétaux arrachés), reprise rapide des végétaux lorsque les rhizomes ont été mal extirpés.

⇒ le faucardage

Pour les plans d'eau qu'on ne peut envisager de vidanger, on peut procéder à un faucardage quand la végétation aquatique flottante devient trop envahissante ; ce type d'entretien doit absolument être réalisé en rotation sur une partie seulement d'un étang, pour en limiter l'impact écologique.

⇒ l'utilisation d'une bâche

Une technique encore peu utilisée consiste à recouvrir temporairement la zone à traiter d'une bâche opaque. Les végétaux privés de lumière dépérissent. Il est cependant conseillé d'exporter la matière organique ainsi éliminée.

⇒ le ratissage ou le dragage des végétaux flottants

Les techniques consistant à retirer les végétaux aquatiques depuis une embarcation par

ratissage ou par dragage permettent une ouverture du milieu. Cependant celle-ci s'avère généralement de courte durée.

⇒ l'emploi d'herbicides

L'emploi d'herbicides chimiques est totalement déconseillé dans les sites à vocation écologique pour les raisons suivantes :

- 1) destruction d'habitats ;
- 2) décomposition des végétaux éliminés entraînant une prolifération d'algues (généralement filamenteuses) et un déficit en oxygène ;
- 3) toxicité immédiate ou à long terme sur de nombreux organismes ; les herbicides à base de 2-4-D sont par exemple connus pour être très néfastes sur les invertébrés aquatiques ;
- 4) l'effet des herbicides est temporaire ; par ailleurs compte tenu de leur efficacité sélective, ils éliminent certaines espèces mais en favorisent d'autres ; les espèces les plus tenaces ont alors tendance à proliférer.

⇒ l'assec

Pour les plans d'eau isolés de la nappe et disposant d'un système de vidange, on pourra les vider totalement. C'est ce qu'on appelle l'assec. Cette technique, qu'on ne doit pratiquer que périodiquement (tous les 5 à 10 ans en général)⁽²⁹⁾ présente différents avantages :

- 1) la possibilité d'intervenir directement sur le fond de l'étang, de le curer en particulier et de limiter son envasement ;
- 2) le développement d'une flore souvent éphémère mais de grand intérêt se développant sur les vases exondées ;
- 3) sur les plans d'eau où l'on cherche à augmenter la productivité, la minéralisation des sédiments permet d'y parvenir sans créer de phénomène d'eutrophisation : développement du plancton, de la faune invertébrée, de la végétation aquatique.

Pratiquée en hiver, dans des régions où il gèle, cette méthode entraîne la mort des rhizomes de plantes aquatiques.

Les méthodes de limitation de la prolifération des algues

La prolifération algale est un phénomène lié à l'eutrophisation et à la température qui est très dommageable aux herbiers aquatiques. En dehors de la réduction des intrants responsables de l'eutrophisation, une solution simple a fait ses preuves en Grande-Bretagne : elle consiste à disposer des rouleaux de paille fraîche d'orge



Photo 73. Ce saule dessouché a été volontairement laissé sur la berge pour des raisons écologiques. Entre autres fonctions, il fournira des micro-habitats aquatiques (Écosphère – M. Pajard).

dans la zone aquatique peu profonde ; un rouleau reste efficace pendant 6 mois pour 0,4 ha. Les méthodes parfois conseillées consistant à utiliser du sulfate de cuivre sont à proscrire, car ce produit est très toxique pour les poissons et les mollusques.

Les prélèvements sur la population de poissons

Le retrait d'une partie du peuplement de poissons Cyprinidés (*fish removal*) est un mode de gestion utilisé soit pour favoriser les Anatidés, soit pour baisser la richesse nutritive. Sur ce dernier point les effets sont variables. En revanche, on constate une reprise des macrophytes flottants et une augmentation corrélative des effectifs d'oiseaux d'eau.

L'intérêt des débris ligneux volumineux

Contrairement à ce que pensent beaucoup de gens, une berge ne doit pas être débarrassée des débris ligneux volumineux qui peuvent s'y accumuler.

Ces troncs, accumulations de branches, souches, racines ont différents rôles :

- protection des berges contre le batillage ;
- création de mares ou d'anses et même de micro-mares à la surface même du bois ;
- piégeage des sédiments et des matières organiques qui sont ensuite larguées progressivement ;
- micro-habitat pour les Invertébrés, les Poissons, les Oiseaux...

5.2. Les vasières et les grèves

On regroupera sous ce chapitre les milieux minéraux périodiquement inondés dépourvus de végétation, ou du moins faiblement végétalisés.

Les vasières

Une vasière est un milieu, composé de sédiments fins, très riche en matières nutritives. Les plus grands milieux de vasières se trouvent dans les estuaires des fleuves, où l'alternance des marées permet leur pérennisation. Cependant les berges de lacs et étangs naturels recèlent aussi des vasières, dont le rythme hydrique est marqué non plus par les marées mais par les saisons.

Une vasière est une berge d'étang, non colonisée par une végétation élevée et dense, et suffisamment plate pour être progressivement découverte par les eaux à mesure que le niveau de celles-ci baisse – on emploie aussi le terme de platière -. En conditions naturelles, ce type de milieu est temporaire ou sans cesse rajeuni par des marées ou des inondations.

Selon la saison et les niveaux d'inondation, ces vasières sont utilisées en recherche alimentaire par les Limicoles migrateurs et hivernants (chevaliers, bécasseaux, gravelots...), ainsi que par les Anatidés (canards, oies...).

Les grèves

Les grèves sont des milieux minéraux présentant une granulométrie diversifiée et qui sont moins riches en matières nutritives que les vasières. On trouvera cependant tous les intermédiaires entre les deux types de milieux. Les grèves naturelles se forment généralement en bordure ou dans le lit mineur des fleuves ayant conservé un fuseau de liberté.



Photo 74. Milieu de grève sur une berge de gravière exposée aux vents dominants. Le batillage empêche la colonisation végétale et maintient le caractère minéral de la grève (Écosphère – Ph. Dasnias).

⁽²⁹⁾ Sauf lorsque le but est de favoriser des vasières : dans ce cas les assècs peuvent être annuels.

tes eaux estivales ne concernent que quelques bassins (Rhône, Rhin, Isère, Durance, Adour...). Selon ces différents régimes hydriques, des zones de grèves et vasières peuvent donc apparaître à différentes saisons. Cependant la situation naturellement la plus fréquente est de les voir apparaître de la fin du printemps au début de l'automne.

5.2.1. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'AMÉNAGEMENT DES GRÈVES ET DES VASIÈRES

Les vasières

Le fonctionnement écologique des vasières est lié à un rythme hydrique et une richesse nutritive ; cette richesse entraîne le développement d'une riche faune invertébrée vivant dans les sédiments ou les eaux peu profondes (insectes adultes ou larvaires, crustacés, vers, mollusques...). Les réinondations régulières ne permettent qu'une faible colonisation végétale. La productivité en invertébrés est une manne alimentaire pour les oiseaux d'eau migrateurs, par-

ticulièrement lors de leurs passages post-nuptiaux (été – automne), mais aussi pré-nuptiaux (printemps) et même en hiver pour les surfaces les moins profondes.

Les oiseaux d'eau les plus concernés sont d'abord les Limicoles (courlis, barges, chevaliers, bécasseaux, gravelots...); ces espèces, autrefois appelées échassiers, présentent souvent de longues pattes par rapport à leur taille, ce qui leur permet de marcher dans des milieux inondés ; cependant la profondeur qu'ils peuvent supporter dépend de leur taille. Ils sont par ailleurs pourvus de becs adaptés de différentes façons à la recherche alimentaire dans les vases riches en invertébrés.

Les Anatidés (famille des canards) exploitent également ce type de milieu pour leur recherche alimentaire de diverses manières :

- la plupart des canetons ont un besoin vital de milieux très riches en invertébrés ;
- les adultes exploitent les graines et les invertébrés à des profondeurs dépendant de leurs adaptations (canards de surface, canards plongeurs) ;

FIG. 77. – Les Limicoles ou échassiers ont des anatomies variables (taille, longueur et forme du bec...) les amenant à exploiter des grèves et vasières de différentes profondeurs (dessin : M. Pajard).

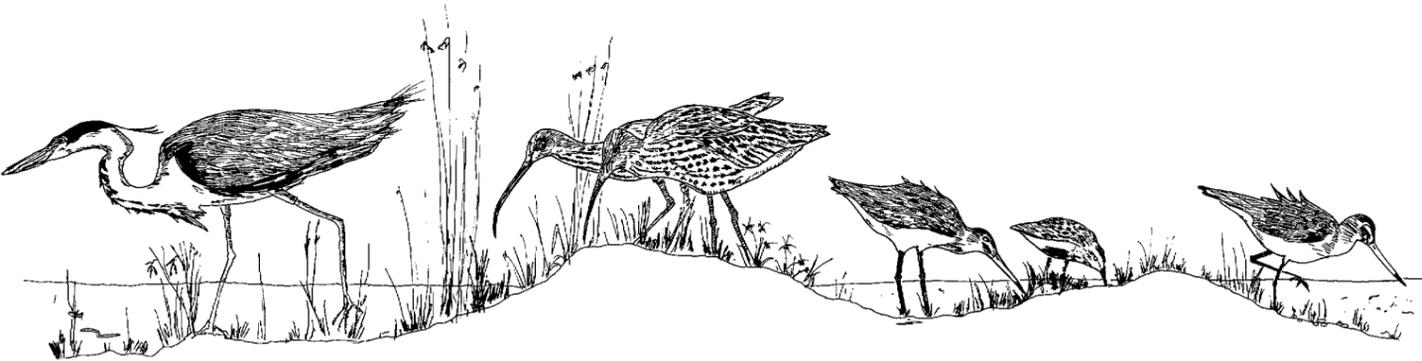


Photo 75. Ce milieu de type "vasière" se développe dans une ancienne gravière sur des fines de décantation qui y ont été déversées. Il est entretenu par des inondations naturelles régulières (CNC – Y. Lescouarnec).

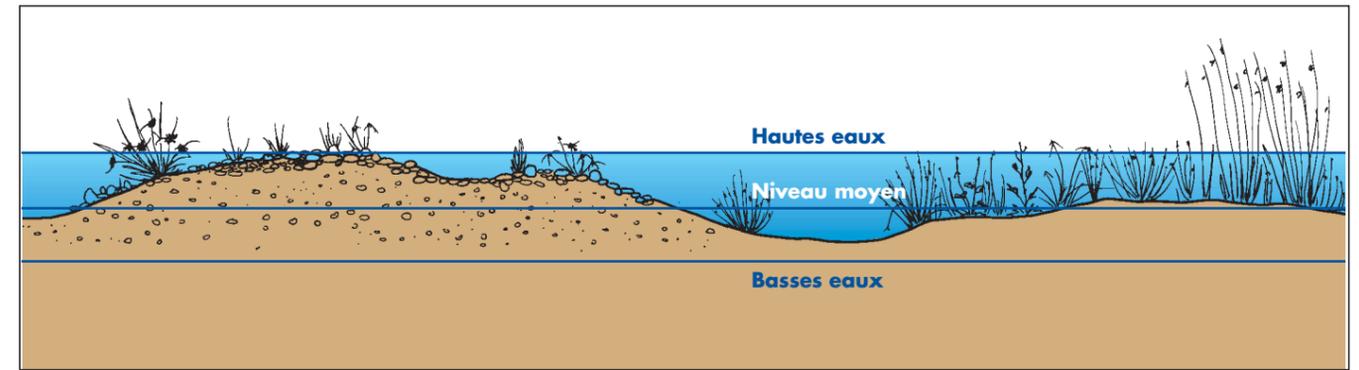


FIG. 78. – Coupe de principe de l'aménagement de grèves et vasières.

On notera en particulier les micro-ondulations topographiques, le calage par rapport aux niveaux d'eau et la diversité de granulométrie des substrats employés (dessin : M. Pajard).

- enfin les canards herbivores consomment la végétation qui colonise les vases lorsqu'elles sont exondées.

Les grèves

Les grèves, de même que les vasières sont soumises à une alternance de submersion et d'immersion. Selon la saison à laquelle elles émergent, leur rôle écologique est différent.

- au printemps, elles fourniront à un certain nombre d'espèces (Sternes, Laridés...) leur habitat préférentiel de nidification ;
- à d'autres saisons, elles serviront de lieux de repos et de mue.

5.2.2. LE RÔLE DES GRÈVES ET DES VASIÈRES DANS LA BIODIVERSITÉ

Parmi les espèces d'oiseaux susceptibles de nicher sur des grèves exondées, certaines sont peu communes à rares en France. Pour ne citer que des espèces ayant niché sur gravière, il s'agit par exemple de la Mouette mélanocéphale (*Larus melanocephalus*), des trois espèces de gravelots (*Charadrius sp.*) nicheuses en France ou des Sternes pierregarin et naine (*Sterna hirundo*, *Sterna albifrons*).

D'un point de vue végétal, les vasières et grèves abritent des espèces remarquables, pionnières de milieux minéraux récemment exondés. Les espèces suivantes ont par exemple été trouvées sur des carrières en eau, dans des régions où elles sont rares : Renoncule scélérate (*Ranunculus sceleratus*), Patience maritime (*Rumex maritimus*), Pulicaria vulgaire (*Pulicaria vulgaris*), Ludwigie des marais (*Ludwigia palustris*), Scirpe ovoïde (*Eleocharis ovata*), Souchet de Micheli (*Cyperus michelianus*).

5.2.3. L'AMÉNAGEMENT DE GRÈVES ET VASIÈRES SUR CARRIÈRE

La création de ces milieux est souhaitable dans les carrières en eau. Pour ce qui concerne les grèves des carrières, on sait le rôle important

qu'elles jouent pour la nidification du Petit gravelot, nicheur rare en France mais fréquent sur carrière. Les vasières sont plus difficiles à réaliser. Par ailleurs, des vasières de gravières peuvent difficilement soutenir la concurrence avec les vasières naturelles, ni en nombre d'espèces, ni en nombre d'individus. Cependant, elles peuvent concourir à créer un réseau de riches zones d'alimentation, utiles à divers oiseaux d'eau à différentes périodes de leur cycle biologique. Les vasières situées le long d'axes migratoires seront toujours plus diversifiées en espèces que les autres, qui ne sont cependant pas sans intérêt. On peut évoquer à cet égard l'intérêt ornithologique des bassins de décantation de sucrerie, connus pour accueillir de nombreux oiseaux d'eau associés aux vasières.

Toutefois, on gardera à l'esprit que ces milieux doivent être sans cesse rajeunis. Il est donc conseillé de se poser la question de savoir si, dans le cadre du projet, cette régénération peut être obtenue soit par les inondations naturelles (connexions hydriques + travaux de terrassements adaptés), par une gestion hydraulique spécifique ou par des méthodes d'entretien dirigé.

Superficie, forme, localisation

La taille idéale d'une vasière se situe entre 1 et 5 ha. Quand elles sont trop petites, elles ne garantissent pas aux oiseaux une tranquillité suffisante. Les Limicoles en particulier sont très sensibles au dérangement. Il vaut mieux deux vasières de 5 ha qu'une seule de 10 ha (ces conseils sont issus de l'expérience des naturalistes et chasseurs français ou britanniques). La multiplication le long de la berge de petites anses et la réalisation d'îlots augmentent la capacité d'accueil de la vasière en fournissant des lieux de repos. Cependant, la forme d'une vasière doit être compacte, toujours pour des questions de sensation de sécurité des oiseaux.

Les grèves peuvent être beaucoup plus petites que les vasières, surtout s'il s'agit d'îlots ou de promontoire au sein des vasières.

Il est bon que les vasières et les grèves soient pourvues de secteurs protégés du vent qui fourniront des lieux de repos.

Nature et forme du substrat

Les vasières doivent être constituées d'un matériau fin mais non compacté. Le plancher doit être ondulé, faisant alterner des dépressions (qui resteront en eau longtemps) et des petites buttes (qui s'exondent les premières). La richesse en nutriments doit être assez élevée, c'est pourquoi on pourra y régaler environ 0,3 m de terre végétale. Si l'on souhaite éviter l'eutrophisation d'autres parties du site, on pourra créer les zones de vasières sur des parties séparées et étanches, ce qui pourra d'ailleurs favoriser la gestion hydraulique. Cette séparation peut d'ailleurs résulter de la réutilisation de bassins de décantation.

Pour les grèves, on utilisera des sables et graviers aussi dénués que possible d'éléments fins.

Les niveaux d'eau

La question des niveaux d'eau est cruciale pour les vasières, (en particulier les hautes eaux qui assurent la production d'invertébrés benthiques lors de l'exondation et qui limitent la colonisation végétale). On doit donc prévoir cet aspect avec rigueur :

- soit en aménageant des systèmes de contrôle des niveaux d'eau : il est alors intéressant de disposer de plusieurs vasières à alimentation hydrique autonome, afin de faire varier leurs niveaux d'eau selon les objectifs recherchés ; on remarquera que dans ce cas, les différents « casiers » doivent être raisonnablement étanches (voir les conseils pratiques pour la construction de digues au chapitre dévolu aux travaux).
- soit en prévoyant une large gamme de niveaux de terrassement afin de s'affranchir des incertitudes quant aux niveaux piézométriques : à cause des inévitables imprécisions topographiques dans la conception, il faut réaliser une pente générale très douce prévoyant différents niveaux d'eau possibles.



Photo 76. Secteur de grèves et vasières aménagé sur une gravière. On remarque d'une part les variations topographiques qui ménagent des zones diversement inondées ou exondées d'autre part la diversité des substrats (fins au premier plan, plus caillouteux à l'arrière-plan) (CNC – ECTARE).

Complémentarité des habitats

Comme on l'a vu, une vasière bien conçue propose déjà par elle-même des habitats complémentaires : niveaux d'eau divers, zones exondées et zones inondées, granulométrie variable du substrat. Les bancs de graviers abrités constituent également des milieux appréciés de nombreux oiseaux d'eau.

Une prairie exploitée extensivement et descendant en pente douce vers la vasière permet à divers canards (Canard colvert, Canard chipeau, Sarcelle d'hiver, Canard souchet...) de disposer d'une ressource alimentaire à proximité de leurs lieux de nidification.

Un fossé d'une profondeur minimale d'un mètre entre la zone de vasière et la berge, outre l'habitat d'intérêt qu'il représente (voir chapitre suivant), permet d'éviter ou du moins de ralentir la colonisation des végétaux vivaces de la rive sur la vasière et limite les éventuels dérangements.

LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES GRÈVES ET VASIÈRES

La gestion des niveaux d'eau est essentielle. Si l'on dispose de systèmes de vannes, on pourra inonder et exonder ces habitats aux bonnes saisons. Si ce n'est pas le cas et que les travaux initiaux se révèlent inadéquats (vasières trop hautes), il faudra retravailler le substrat.

Les grèves et surtout les vasières voient souvent leur niveau topographique monter progressivement par accumulation de sédiments. C'est pourquoi, on pourra régulièrement abaisser ce niveau en retirant la couche supérieure (*étrépage*).

En ce qui concerne la végétation, elle doit rester éparsée et il faut enlever les ligneux dès qu'ils apparaissent. L'inondation hivernale prolongée et haute permet d'empêcher la croissance de nombreuses espèces. Par exemple, une inondation de 1,5 m de novembre à mars contient en général le développement des saules. Pour empêcher la colonisation par des héliophytes, plusieurs techniques sont possibles :

- inondation estivale si c'est possible ;
- inondation printanière, mais on ne peut alors accueillir les oiseaux lors de leur passage pré-nuptial ; cependant si l'on possède plusieurs vasières sur des bassins indépendants, cette inondation peut être réalisée par rotation (un an sur deux par exemple) ;
- exondation et sarclage mécanique ;
- les herbicides sont proscrits compte tenu de leur toxicité en particulier sur les invertébrés.



Photo 77. Ce fossé met en relation la gravière avec une lagune arrière-littorale (CNC - M. Cambrony).

En cas d'invasion par une espèce vivace, le pâturage estival est un bon mode de gestion qui contient la végétation, maintient des zones ouvertes (piétinement) et enrichit le sol en matières organiques (fumure).

des fossés ont été créés. Ce réseau de chenaux et fossés, joue un grand rôle écologique pour la répartition des eaux au sein de la plaine et pour la connectivité des zones humides : transport de sédiments, de matières organiques, de propagules végétales, déplacement des animaux aquatiques...

5.3. Les fossés et les chenaux

Au sein des zones humides naturelles, des chenaux préférentiels d'écoulement se forment. Au sein d'une plaine alluviale naturelle, ces chenaux forment une sorte de réseau appelé « chevelu ». Dans beaucoup de régions, ces chenaux, qu'il s'agisse d'écoulements temporaires ou permanents, sont appelés des « noues » ; souvent ces noues, à l'origine naturelles, ont été recreusées par les hommes au cours des siècles, à des fins de drainage des plaines. Par ailleurs

5.3.1. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'AMÉNAGEMENT DES FOSSÉS ET CHENAUX

Un rôle dans la connexion des zones humides

Des fossés et chenaux créés dans le cadre d'une gravière aménagée écologiquement peuvent concourir à étoffer le « chevelu » hydrographique de l'environnement dans lequel ils s'insèrent. Lorsqu'elle est possible, la création

Photo 78. Les chenaux permettent d'augmenter le linéaire de la zone de contact terre/eau où se développent les milieux aquatiques peu profonds et les zones humides (Écosphère – M. Pajard).



de fossés et chenaux est bienvenue pour la diffusion de l'eau qu'ils permettent et le rôle de connexion qu'ils jouent. En effet, ils peuvent intervenir dans différentes mises en communication :

- au sein du site lui-même, en assurant la circulation d'eaux vives dans les milieux terrestres humides, en reliant des plans d'eau entre eux...
- en alimentant une zone en voie d'assèchement située à proximité de la carrière.
- au contraire en alimentant la carrière elle-même depuis un cours d'eau.
- etc.

Une multiplication de l'effet de lisière

Par ailleurs, les fossés et chenaux sont des habitats aquatiques linéaires, créant sur chacune de leurs berges, une frange de contact terre / eau. Ce type de lisière (ou *écotone*) est particulièrement riche au plan écologique. Or les fossés permettent d'en augmenter considérablement le linéaire.

La biodiversité des fossés et chenaux

Compte tenu de leurs propriétés de connectivité, d'habitat aquatique linéaire et d'écotone, les fossés sont susceptibles d'assurer différentes fonctions pour de nombreuses espèces.

- Les espèces invertébrées des milieux aquatiques peu profonds (voir chapitre sur les habitats aquatiques) y circulent aisément ; les fossés peuvent être très riches en invertébrés.
- Des poissons de valeur comme le Brochet ou l'Anguille les utilisent⁽²⁹⁾ : soit pour circuler et rejoindre le cours d'eau dans le cas des alevins de brochet, soit même pour frayer quand les berges sont en pente douce ou présentent un replat.

• Inversement, on peut aménager un fossé⁽³⁰⁾ (mise en place de grilles, petites vannes à batardeaux⁽³¹⁾...) pour contrôler la population de poissons et favoriser les Amphibiens, les Odonates...

- Un fossé crée une diversification au sein des milieux qu'il traverse et permet par exemple la multiplication des zones favorables à l'implantation des espèces végétales aquatiques ou semi-aquatiques.
- L'effet de lisière évoqué ci-dessus joue pour de nombreux oiseaux aquatiques, en particulier au sein d'une roselière, où les chenaux assurent une zone d'alimentation (richesse en invertébrés et plantes aquatiques), une zone de tranquillité avec des caches possibles pour la mue par exemple, un lieu discret de nidification...

Exemples d'oiseaux d'eau utilisant les lisières des chenaux au sein des roselières

Butor blongios (*Ixobrychus minutus*)
Héron cendré (*Ardea cinerea*)
Râle d'eau (*Rallus aquaticus*)
Poule d'eau (*Gallinula chloropus*)
Rousserolle effarvatte (*Acrocephalus scirpaceus*)
Canard colvert (*Anas platyrhynchos*)
Sarcelle d'hiver (*Anas crecca*)

- la musaraigne aquatique ou le campagnol aquatique, petits mammifères d'intérêt, trouvent dans les berges des fossés des habitats de substitution.

Utilité des fossés dans l'amélioration de la qualité des eaux

Dans le cas d'apports d'eau de qualité médiocre vers le plan d'eau, un fossé convenablement situé peut capter ces eaux et servir de piège à sédiments et à polluants. Il concourra ainsi à améliorer la qualité des eaux circulant sur le site. On peut d'ailleurs faire circuler le fossé au sein d'une formation de grands hélophytes connus pour leurs capacités épuratrices : roseau commun, massettes, scirpes...

Utilisation des fossés pour limiter la progression des hélophytes

Les fossés d'une profondeur en eau d'au moins 1 m à 1,5 m en été permettent de stopper l'expansion naturelle des hélophytes (et particulièrement du roseau commun) sur des zones où il est indésirable.

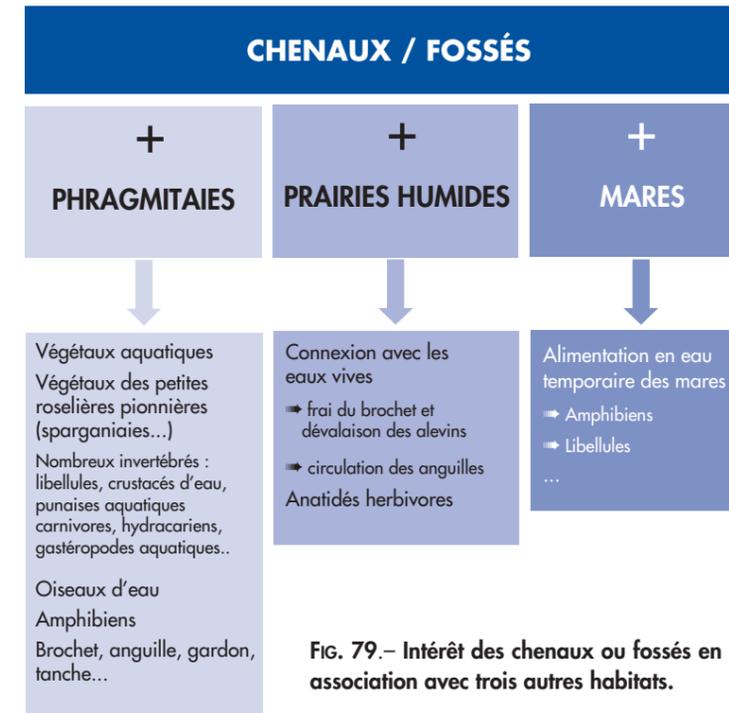
(29) Il s'agit alors des fossés d'une plaine alluviale inondable.

(30) Hormis sur des sites très régulièrement inondés.

(31) voir le chapitre consacré aux ouvrages de contrôle des eaux.

Photo 79.

Aménagement d'un fossé destiné à séparer deux habitats distincts et à limiter la progression des hélophytes d'un milieu vers l'autre (Écosphère. M. Pajard).



Les fossés utilisés pour canaliser la fréquentation et la prédation

Des fossés suffisamment profonds (1 m) et larges (2 à 3 m) permettent, sur des sites ouverts au public, de protéger certaines zones sensibles à la fréquentation. Ce type d'aménagement doit être accompagné des équipements destinés à assurer la sécurité des personnes.

De même, pour protéger des zones de nidification sensibles (en particulier s'il s'agit de milieux découverts), les fossés font hésiter les prédateurs d'œufs et de poussins (chiens errants, renards, gros rongeurs...) même s'ils sont capables de nager.

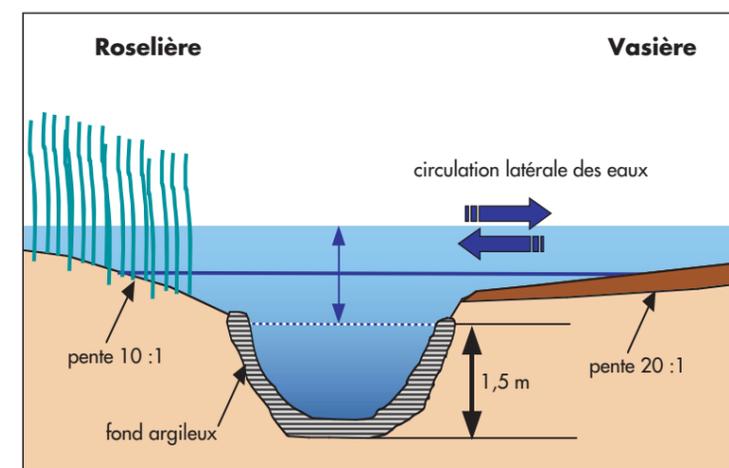
5.3.2. L'AMÉNAGEMENT DES FOSSÉS ET CHENAUX SUR CARRIÈRE

Avant toute chose, insistons sur le fait qu'un réseau de fossés ou de chenaux est toujours plus favorable qu'un seul fossé (surtout linéaire), car il assure une meilleure diffusion des eaux, ménage plus de zones abritées, multiplie le linéaire de « lisière » terre / eau...

Les fossés et chenaux sont souvent créés d'abord dans le but d'alimenter en eau ou de drainer des zones. Ceci ne doit pas empêcher de les conce-



Photo 80-81. Aménagement d'un chenal à l'automne et mise en eau en hiver. On remarquera la très faible déclivité des berges (Écosphère. M. Pajard).



voir afin de maximiser leur potentiel écologique, en favorisant la zone de battement des eaux.

Les chenaux

Dans le cas des chenaux, où l'on dispose d'une largeur supérieure, on prévoira de chaque côté, ou d'un seul côté, des pentes de l'ordre de 10:1 à 20:1, assurant une connectivité latérale des eaux et une importante zone de transition entre milieu aquatique et milieu terrestre humide. Si l'on a des problèmes d'étanchéité du chenal, c'est une occasion d'utiliser des argiles issues de l'exploitation.

FIG. 80. – Aménagement d'un chenal et de ses relations latérales avec une roselière et une vasière.

Photo 82.

Aménagement d'un chenal temporairement inondé (Écosphère. M. Pajard).

La reconstitution d'une « noue »

Dans ces chenaux des plaines alluviales qu'on appelle des « noues » dans beaucoup de régions, l'eau peut circuler en permanence ou seulement lors d'épisodes de hautes eaux, mais la nappe n'est jamais loin et le sol ne s'assèche jamais. Autrefois, l'exploitation traditionnelle des « noues » consistait en prairies inondables (fauche ou pâturage), certaines pouvant abriter des espèces végétales aujourd'hui très rares. L'évolution normale de la végétation a souvent conduit à des formations à grandes laïches (magnocariçaies) puis à des aulnaies.

Il arrive assez fréquemment qu'au sein des terrains exploités se trouve une « noue » dégradée par des plantations de peupliers ou une mise en culture (les noues non dégradées sont à conserver). Un décapage sélectif de ces chenaux en deux passes (1 : couche humifère, 2 : couche argileuse grisâtre à verdâtre) permet de reconstituer lors de l'aménagement, un chenal du type « noue ». Il est possible alors que des espèces d'intérêt (dont des propagules étaient contenus dans le sol) reprennent spontanément. On pourra par ailleurs créer et entretenir des milieux de prairies humides ou de cariçaies dans un contexte de sol et d'alimentation hydrique favorable.



FIG. 81. – Reconstitution d'une noue avec remise en place des couches humifère et argileuse décapées sélectivement.

Exemples de relations latérales avec une prairie humide et une cariçaie.

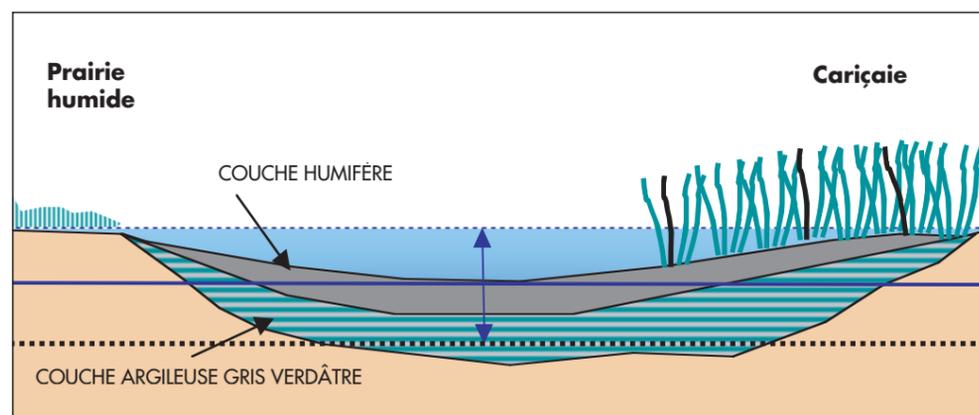


FIG. 82. – Aménagement de petites zones humides linéaire le long d'un fossé.

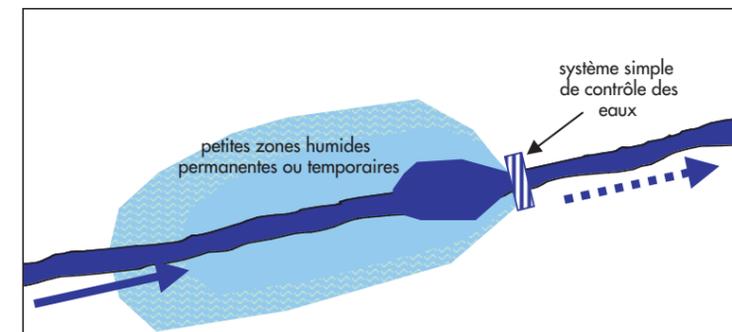
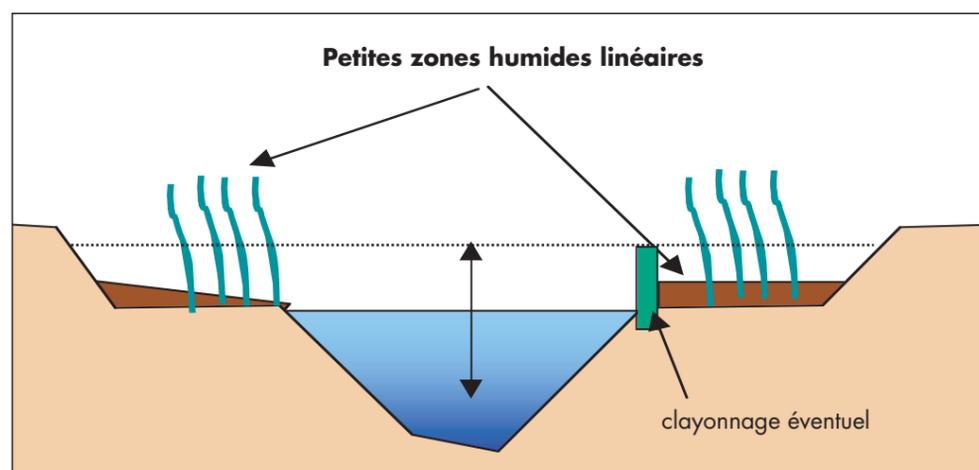


FIG. 83a. – Aménagement d'une petite zone humide à niveau d'eau contrôlable en barrant un fossé d'écoulement.

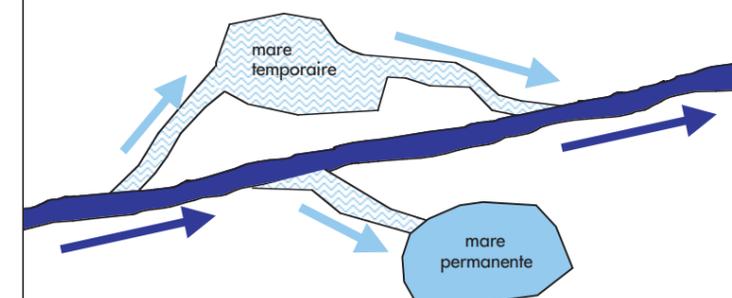


FIG. 83b. – Débordement du fossé vers des habitats aquatiques temporaires ou permanents.

les fossés

Dans le cas des fossés, on peut créer de petites zones humides au niveau de chaque berge, en créant des risbermes, avec éventuellement un système de clayonnage si le substrat n'est pas très stable. On pourra également créer de petites zones humides à niveau d'eau contrôlable, en bloquant avec un petit barrage simple (type vanne à batardeau) des rigoles d'écoulement.

Enfin, il est intéressant de connecter les fossés à des habitats aquatiques temporaires ou permanents comme des mares, qui seront ainsi alimentés en eau lors des débordements.

La végétalisation

Dans le cas des fossés, la végétalisation dirigée n'est pas très utile car une colonisation spontanée se fera rapidement depuis les milieux mis en relation avec ces fossés : berges d'étangs, mares... Dans le cas des chenaux et noues, la transplantation de spécimens (par exemple de *Carex*) venant de milieux voisins et similaires peut être envisagée.

5.3.3. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES FOSSÉS ET CHENAUX**Le curage**

L'évolution inéluctable des fossés et chenaux conduit à leur comblement par accumulation de litière, de sédiments, de débris divers. Ceci nuit à leur rôle de conduction des eaux.

Si de plus, ce comblement s'accompagne d'une eutrophisation, les effets écologiques sont également néfastes. Les fossés trop peu profonds avec des eaux trop riches en éléments nutritifs (eutrophisés) voient leur écosystème se simplifier. En particulier le nombre d'espèces d'invertébrés se réduit beaucoup. Ce type de fossé devient en outre facilement favorable à la prolifération des moustiques.

Un curage régulier, mais modéré, est donc nécessaire. Les petits fossés peuvent être curés manuellement en période de basses eaux. Cependant on cure généralement à la pelle mécanique depuis la berge (tous les 5 à 25 ans selon la vitesse du comblement). Ce type d'intervention étant très perturbateur pour les biocénoses, il est conseillé de ne pas curer tout le réseau de fossés la même année, afin de permettre une recolonisation.

Pour les larges chenaux, on pourra envisager des dragues suceuses, qui permettent un curage efficace sans remise en suspension des vases, mais dont le prix de revient est élevé.

Dans tous les cas, il est conseillé de ne pas déposer les produits de curage le long des berges, où ils risquent de favoriser la reprise rapide d'une végétation envahissante de friches.

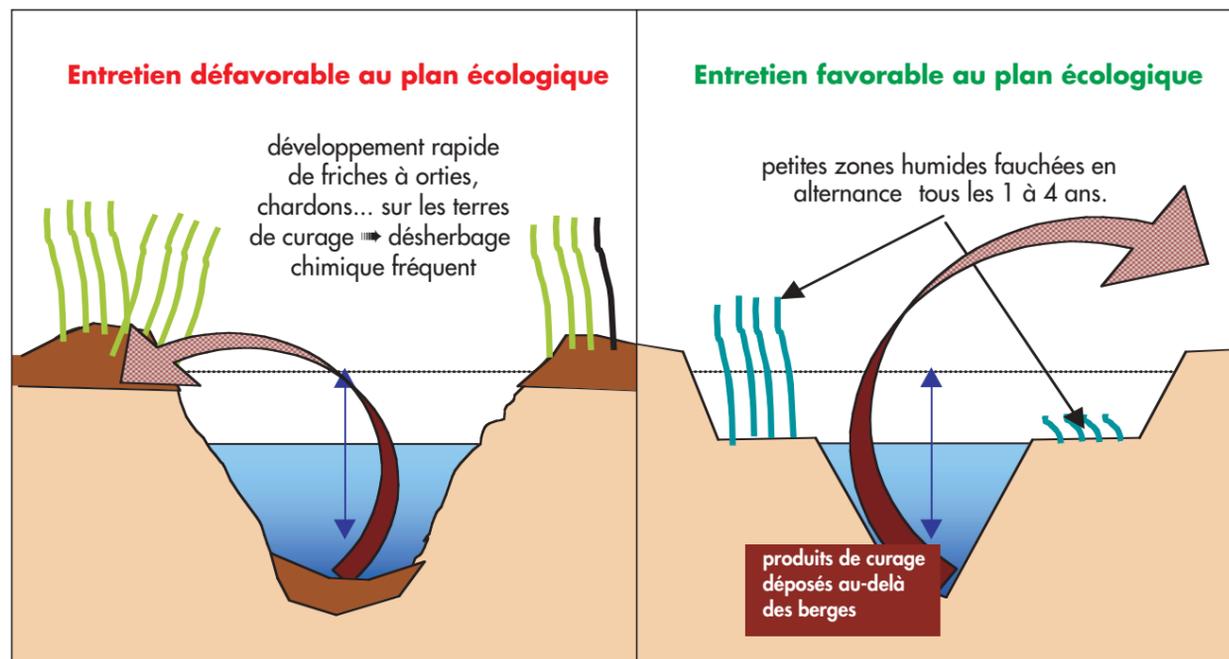


FIG. 84. – Différences entre un entretien favorable et un entretien défavorable au plan écologique d'un fossé.

Entretien de la végétation

La végétation des berges des fossés doit être entretenue pour éviter un embroussaillage et une prolifération des espèces ligneuses.

Les fossés sont souvent soumis à des entretiens très drastiques aux herbicides, destinés à éliminer la végétation afin que l'eau s'écoule le plus vite possible. En réalité, il vaut mieux que l'eau s'écoule régulièrement tout au long du fossé, légèrement freinée par une végétation de berge entretenue, qui de surcroît évite les problèmes d'érosion. Une bonne manière d'entretenir les fossés consiste à faucher les berges en alternance tous les 1 à 4 ans selon la vigueur de la végétation. Afin de ne pas accentuer le comblement du fossé, il est recommandé d'enlever les produits de la fauche.

Si le fossé dispose de l'aval d'une vanne de contrôle des eaux, on pourra entretenir la végétation en gérant les niveaux d'eau : par exemple des inondations printanières et estivales atteignant 1 m assurent en général la destruction des héliophytes de berge.

5.4. Les ceintures de berges

Les berges en pentes douces à très douces constituent le profil idéal pour les rives d'un site à vocation écologique. Cependant, il faut bien reconnaître que cela n'est pas toujours possible, pour des raisons de déficit de matériaux, par manque d'espace entre le plan d'eau et les limites du site...

Les berges en pente très douce permettent d'exprimer de façon nette la zonation classique de la végétation en fonction de la profondeur en eau ou de la fréquence des inondations :

végétation aquatique flottante → *végétation aquatique enracinée immergée* → *végétation aquatique semi-immersée* → *végétation vivace presque toujours inondée* → *végétation annuelle des grèves inondées l'hiver, exondées l'été* → *végétation prairiale hygrophile régulièrement inondée* → *végétation mésohygrophile rarement inondée...*

Une zonation aussi précise est cependant peu fréquente et l'on est le plus souvent en présence de berges où les différents types de végétation ci-dessus évoqués se « télescopent ». Nous ne nous intéresserons plus ici à la végétation aquatique *sensu stricto* qui a déjà été abordée. On simplifiera donc en trois zones :

- **la zone à héliophytes**⁽³³⁾, appelée ainsi car c'est ce type de végétaux qui y dominent, située entre le niveau d'étiage et le niveau moyen du plan d'eau ; les héliophytes stricts comme la Glycérie aquatique (*Glyceria aquatica*), le Butome en ombelles (*Butomus umbellatus*), le Rubanier rameux (*Sparga-*

nium erectum)... supportent peu la dessiccation du sol ; ils peuvent d'ailleurs être considérés comme des végétaux aquatiques semi-immersés. Les héliophytes mixtes par exemple les grandes Laïches (*Carex riparia*, *C. acutiformis*, *C. elata*...) ou le Roseau (*Phragmites australis*) supportent les exondations estivales et même des périodes de sécheresse et peuvent se retrouver plus haut sur la berge.

- **la zone à végétation hygrophile** située entre le niveau moyen du plan d'eau et les hautes eaux moyennes ; le sol y est toujours soit inondé, soit très engorgé du fait de la proximité de la nappe alluviale.

- **la zone à végétation mésohygrophile** qui n'est qu'exceptionnellement atteinte par des inondations, mais où le sol est gorgé d'eau une partie de l'année variable selon le régime hydrologique de la région.

(33) Une plante héliophyte est un végétal vivace, croissant enraciné dans la vase où sont situés les bourgeons d'hiver, dont la partie inférieure est habituellement submergée et la partie supérieure émergée.

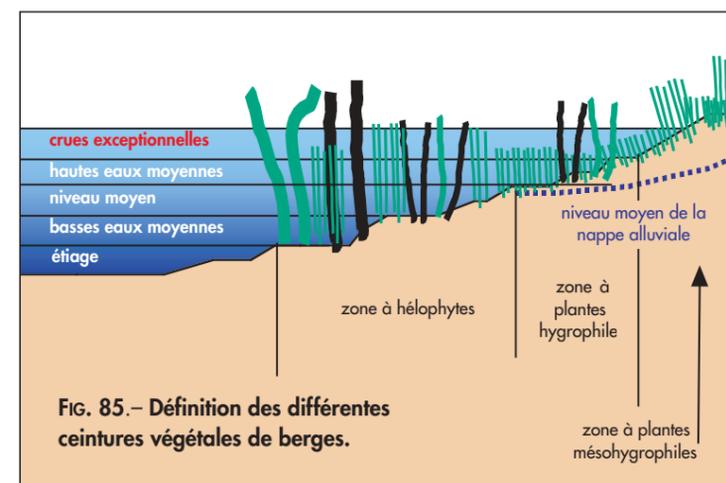


FIG. 85. – Définition des différentes ceintures végétales de berges.

Photo 84. Sur cette photographie prise en période de moyennes eaux, on voit nettement le passage de la ceinture d'héliophytes (massettes avec "les pieds dans l'eau") aux ceintures de végétation terrestre hygrophile et mésohygrophile. CNC - C.A.E (Université de Bourgogne).



5.4.1. LES DONNÉES À CONSIDÉRER DANS LE FONCTIONNEMENT DES CEINTURES DE BERGES

Fonctionnement physique

Les ceintures végétales de berge constituent par excellence le milieu de transition (écotone) entre les habitats aquatiques et la terre ferme. Le rôle et l'intérêt écologiques de ces franges de végétation sont importants à considérer lors de la conception et de la végétalisation. On peut citer entre autres :

- la stabilisation des berges par le système racinaire des végétaux, qui se développent horizontalement et verticalement, pouvant descendre jusqu'à plusieurs mètres de profondeur (exemple : la Fétuque faux-roseau – *Festuca arundinacea* – possède un chevelu descendant jusqu'à 2,5 m de profondeur pour une hauteur moyenne de 70 cm à 1 m).

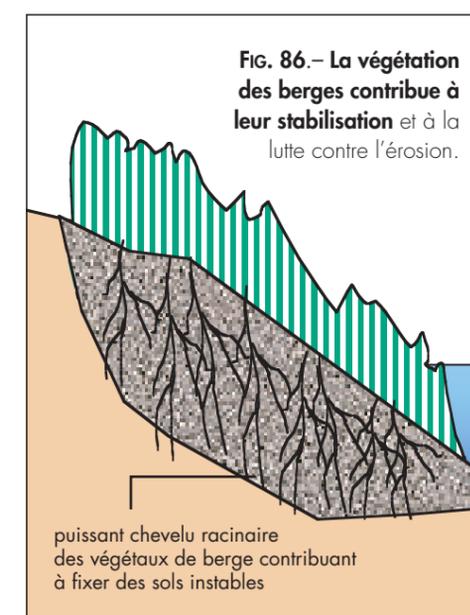


FIG. 86. – La végétation des berges contribue à leur stabilisation et à la lutte contre l'érosion.

puissant chevelu racinaire des végétaux de berge contribuant à fixer des sols instables

- le captage et le piégeage des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement (en particulier par le système racinaire) : cette rétention de particules fines ralentit l'envasement des plans d'eau et retient les matières polluantes souvent intimement liées aux argiles.

Photo 83. Ce fossé aux berges raides et entretenu de manière excessive ne présente que peu d'intérêt écologique. Les eaux risquent de s'y écouler trop rapidement, entraînant limons et argiles (Écosphère - Ph. Dasnias).



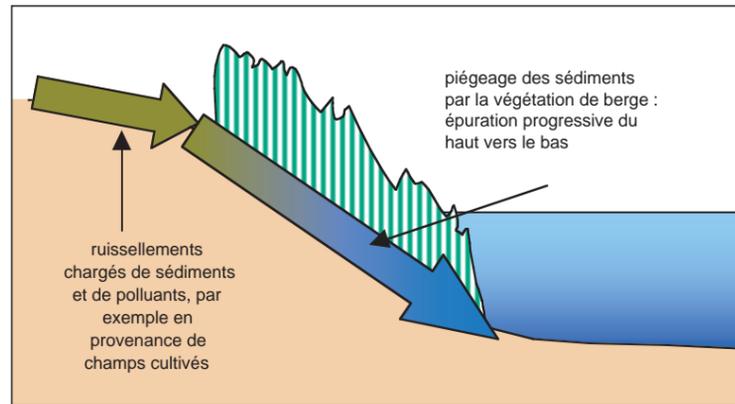


FIG. 87. – La végétation des berges piège les sédiments et concourt à l'épuration des eaux de ruissellement.

Fonctionnement biologique

- les ceintures hélophytiques de berges forment un véritable écosystème, à la surface de leurs feuilles et dans l'entrelacs aquatique que forment leur parties végétatives où se fixe une grande partie du périphyton ;
- elles constituent une ressource alimentaire pour les espèces phytophages (feuilles, graines, nectar...) et une source de matière organique pour les détritivores ;
- les poissons phytophiles y déposent leurs pontes et elles constituent un abri pour le frai ;
- les ceintures hélophytiques constituent également l'habitat principal des Odonates (= libellules) ;
- elles constituent un lieu de nidification pour diverses espèces d'oiseaux d'eau qui y trouvent des matériaux pour la construction des nids et un abri contre la prédation.

5.4.2. LE RÔLE DES CEINTURES DE BERGES DANS LA BIODIVERSITÉ

La frange de végétation d'un plan d'eau est particulièrement riche en invertébrés de toutes sortes. On y trouve en particulier des araignées spécialisées (pirates, dolomèdes, clubionés...).

De nombreuses espèces d'oiseaux remarquables nichent dans les ceintures de berges : Anatidés (Canards souchet et chipeau, Sarcelles, Nette rousse...), Grèbes, Rallidés (Râle d'eau, Marouette ponctuée...) et passereaux paludicoles (Rousserolles, Phragmite des joncs, Gorgebleue...).

Les berges accueillent par ailleurs des végétaux rares des roselières, mégaphorbiaies ou prairies hygrophiles comme le Butome en ombelles (*Butomus umbellatus*), la Laïche faux-souchet (*Carex pseudocyperus*), l'Impérata cylindrique (*Imperata cylindrica*), la Menthe pouliot (*Mentha pulegium*), la Véronique à écussons (*Veronica scutellata*), la Grande Berle (*Sium latifolium*)...



Photo 85. Mise en place sur un site en cours d'aménagement de touffes de massettes (*Typha*) prélevées aux environs (Écosphère - M. Pajard).

5.4.3. LA VÉGÉTALISATION DES CEINTURES DE BERGES

Le modelé et les terrassements de berges ont déjà été largement traités, c'est pourquoi nous n'aborderons ici que les aspects liés à la végétalisation. Les principales formations végétales des berges se définissent par l'espèce végétale qui les domine. C'est ainsi que l'on pourra créer dans les parties les plus inondées (zone à hélophytes) :

- 1) une scirpaie (à *Schoenoplectus lacustris*) ou une sparganiaie (à *Sparganium erectum*) qui se situent dans la partie la plus inondée de la berge, celle qui fait la transition avec le milieu franchement aquatique avec lequel ces formations sont souvent en mélange.
- 2) une phragmitaie (à *Phragmites australis*) : voir le chapitre particulier consacré à cette formation.
- 3) une glycériaie (à *Glyceria maxima*) qui supporte mieux que la scirpaie ou la sparganiaie les exondations et qui étant moins dense que la phragmitaie permet mieux le développement d'autres espèces.
- 4) en zone méditerranéenne des roselières à Canne de Ravenne (*Erianthus ravennae*) et Impérata cylindrique (*Imperata cylindrica*) qui forme des roselières de très haute taille, où se mêle également la sous-espèce *chrysantha* du Roseau commun.

Il existe d'autres formations comme les typhaies (à *Typha latifolia* et *T. angustifolia*), les phalaridaies (à *Phalaris arundinacea*), les roselières à Canne de Provence (*Arundo donax*)... Cependant, ces formations sont d'un intérêt écologique modéré, s'implantent facilement et ont tendance à l'envahissement sur carrière.

TABLEAU XVIII. – Espèces* classiques pour végétaliser des bas de berges toujours inondés (eaux mésotrophes à eutrophes).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
ESPÈCES DOMINANTES (chacune d'entre elles peut former la trame de la végétation)			
Glycérie aquatique	<i>Glyceria maxima</i>	godet (racines nues)	plantation
Jonc des chaisiers	<i>Schoenoplectus lacustris</i> (= <i>Scirpus lacustris</i>)	racines nues godet (semences)	plantation (semis)
Laïche des marais	<i>Carex acutiformis</i>	racines nues godet	plantation
Laïche des rivages	<i>Carex riparia</i>	racines nues godet	plantation
Laïche paniculée	<i>Carex paniculata</i>	racines nues godet	plantation
Roseau commun	<i>Phragmites australis</i> (= <i>Phragmites communis</i>)	racines nues godet (semences) (nappe pré-ensemencée)	plantation (semis)
Rubanier rameux	<i>Sparganium erectum</i>	racines nues godet	plantation
ESPÈCES COMPAGNES			
Iris jaune	<i>Iris pseudacorus</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Laïche faux-souchet	<i>Carex pseudocyperus</i>	racines nues godet (semences)	plantation (semis)
Lysimaque commune	<i>Lysimachia vulgaris</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Myosotis des marais	<i>Myosotis scorpioides</i> (<i>Myosotis palustris</i>)	godet (racines nues)	plantation
Plantain d'eau commun	<i>Alisma plantago-aquatica</i>	godet (semences)	plantation (semis)
Patience d'eau	<i>Rumex hydrolapathum</i>	godet (racines nues) (semences)	plantation (semis)
Sagittaire	<i>Sagittaria sagittifolia</i>	godet racines nues	plantation plantation
Véronique des ruisseaux	<i>Veronica beccabunga</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

TABLEAU XIX. – Espèces* classiques pour végétaliser des berges à inondation intermittente (eaux mésotrophes à eutrophes).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
ESPÈCES DOMINANTES (chacune d'entre elles peut former la trame de la végétation)			
Baldingère	<i>Phalaris arundinacea</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Jonc épars	<i>Juncus effusus</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Jonc glauque	<i>Juncus inflexus (= Juncus glaucus)</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Reine des prés	<i>Filipendula ulmaria</i>	godet (racines nues) (semences)	plantation (semis)
ESPÈCES COMPAGNES			
Fétuque faux-roseau	<i>Festuca arundinacea</i>	semences	semis
Iris jaune	<i>Iris pseudacorus</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Lysimaque commune	<i>Lysimachia vulgaris</i>	godet (racines nues) (semences)	plantation (semis)
Menthe aquatique	<i>Mentha aquatica</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Pigamon jaune	<i>Thalictrum flavum</i>	godet (semences)	plantation (semis)
Populage des marais	<i>Caltha palustris</i>	godet racines nues (semences)	plantation (semis)
Salicaire	<i>Lythrum salicaria</i>	godet (racines nues) (semences)	plantation (semis)

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

5.4.4. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES CEINTURES DE BERGES

Les ceintures de berges sont des formations spontanées rustiques qui ne demandent pas *a priori* d'entretien intensif. Cependant, il y a différents cas de figure où l'on peut être amené à intervenir.

- Un problème difficile à éviter à terme (mais qui peut être très lent) tient à l'accumulation de sédiments qui conduit à un atterrissement progressif et une migration de la végétation palustre vers l'intérieur du plan d'eau ; pour une raison ou une autre et particulièrement dans de petites pièces d'eau, on peut avoir à contenir cette progression vers l'intérieur.
- Un autre souci lorsque l'on tient à mainte-

nir ces formations de hautes herbes semi-aquatiques, c'est la possible invasion par les saules qui referment le milieu, phénomène qui n'est pas particulièrement souhaitable pour la valorisation écologique.

- Il est aussi souhaitable de limiter les ceintures de berges pour maintenir des milieux plus ouverts comme des vasières, des milieux aquatiques, des accès herbeux, etc.
- Enfin certaines espèces de berges peuvent être rapidement envahissantes et « étouffer » le reste de la végétation (cas du roseau commun, des massettes, de la glycérie, du rubanier, de l'iris jaune, de certains joncs...)

Il existe différentes techniques de gestion et d'entretien des ceintures de berges de plans d'eau.

Le faucardage

Le faucardage consiste à couper les végétaux semi-aquatiques depuis la berge ou depuis une embarcation, donc à limiter la progression de la ceinture de végétation vers l'intérieur du plan d'eau. Il s'agit d'une opération assez lourde qui entraîne d'importantes modifications écologiques : augmentation des variations de température, changement des cycles de l'azote, du phosphore, de l'oxygène, des matières organiques, perturbation des conditions de ruissellement et de sédimentation, destruction des micro-biotopes, etc. C'est pourquoi cette opération ne doit être envisagée que dans le cas de proliférations excessives des hélophytes au détriment des eaux libres. Par ailleurs, il est préférable de ne faucarder que par secteurs successifs et de ne pas traiter l'ensemble d'un plan d'eau en une seule fois (= faucardage « à blanc »). Afin d'éviter une consommation excessive d'oxygène par la dégradation des végétaux coupés et un excès de matières organiques, il faut toujours récupérer et extraire les produits du faucardage.

En ce qui concerne l'époque, il vaut mieux intervenir en dehors des périodes de nidification des oiseaux d'eau, c'est à dire plutôt d'octobre à février. Cependant, la coupe hivernale a tendance à favoriser le roseau commun. Si l'on veut favoriser les cariçaies, c'est une coupe en été qui est recommandée.

La prolifération excessive des hélophytes vers le centre du plan d'eau étant liée à une accumulation progressive de sédiments, l'efficacité du faucardage pourra être accrue en réalisant dans le même temps un curage des mêmes secteurs. Tout comme le faucardage, il s'agit d'une opération d'entretien pouvant avoir de lourdes conséquences sur les milieux. Les curages seront donc pratiqués de manière modérée, en ne traitant pas toutes les zones en même temps et en évitant de déstabiliser l'ensemble du profil de la berge.

Le contrôle des niveaux d'eau

Lorsqu'on peut gérer les niveaux d'eau, la possibilité d'inonder la végétation des berges est un bon moyen de la limiter. Pour les hélophytes (plantes les plus inondables), il faut prévoir d'inonder au printemps et en été, avec au moins 1 m d'eau et même 2 m pour les espèces les plus résistantes. Plus la montée d'eau est rapide, plus elle est efficace.

Isoler les massifs d'hélophytes par des fossés

Une manière utilisée sur différents sites pour empêcher les hélophytes (qui se développent beaucoup par multiplication végétative : rhizomes, stolons...) de coloniser des zones, consiste

à prévoir dans la conception de les isoler par des fossés de 2 à 4 m de large sur 1 à 2 m de profondeur.

Les autres techniques

La végétation des zones exondées en été peut être gérée par pâturage extensif (ovidés, équidés ou bovidés rustiques).

Pour éliminer les hélophytes dans un secteur précis, on peut disposer une membrane en polyéthylène, qui prive les végétaux de lumière.

Le feu n'est à utiliser qu'avec parcimonie, localement, sous contrôle et uniquement s'il s'agit d'un problème impossible à résoudre autrement.

Enfin, les herbicides sont à proscrire compte tenu de leurs effets indésirables sur toute la chaîne alimentaire. Leur utilisation renforce à terme les espèces les plus résistantes, qui sont souvent envahissantes et sont toujours des espèces banales.

5.5. Les roselières à Phragmite commun (*Phragmites australis*) ou phragmitaies

Les roselières d'une taille respectable (quelques ha) sont un des milieux humides le plus en régression. Plusieurs espèces végétales peuvent former des roselières, mais les plus complexes sont les roselières à Roseau commun (*Phragmites australis*), appelées des phragmitaies. Beaucoup d'oiseaux d'eau menacés ou rares y ont leur habitat. C'est pourquoi, l'opportunité d'en créer sur carrières en eau doit toujours être gardée à l'esprit.

5.5.1. LES DIFFÉRENTS TYPES DE ROSELIÈRES

Le Roseau commun, espèce coloniale, forme la structure végétale des roselières, un peu comme une essence d'arbre dominante forme celle d'une forêt. Mais dans les deux cas, si l'espèce dominante est quasiment seule, formant des rangs serrés et homogènes, l'intérêt est faible. D'ailleurs, le roseau est commun, sans intérêt patrimonial en tant qu'espèce et adapté à une large gamme de milieux. Ce qui est intéressant au plan écologique, ce sont les écosystèmes auxquels il donne lieu. Sans entrer dans le détail, il y a des paramètres essentiels permettant de distinguer différents types de roselières.

La superficie

Les roselières font partie de ces habitats pour lesquels l'effet de taille joue pleinement. On pourra ainsi distinguer :



TABLEAU XX. – Effets de la superficie des roselières sur la présence d'oiseaux nicheurs.

Superficie	Espèces d'oiseaux nicheurs
+ de 20 ha	Butor étoilé (<i>Botaurus stellaris</i>), Busard des roseaux (<i>Circus aeruginosus</i>), Héron pourpré (<i>Ardea purpurea</i>), colonie de Panure à moustaches (<i>Panurus biarmicus</i>)...
5 à 20 ha (ou 1 à 5 ha d'un seul tenant)	Blongios nain (<i>Ixobrychus minutus</i>), Rousserolle turdoïde (<i>Acrocephalus arundinaceus</i>), Locustelle luscinioïde (<i>Locustella luscinioides</i>)...
Moins de 1 hectare	Rousserolle effarvate (<i>Acrocephalus scirpaceus</i>), Phragmite des joncs (<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>), Bruant des roseaux (<i>Emberiza schoeniclus</i>)...

TABLEAU XXI. – Effets de l'humidité des roselières sur la présence d'oiseaux nicheurs.

Humidité	Espèces d'oiseaux nicheurs
Roselière inondée (bordure)	Râle d'eau (<i>Rallus aquaticus</i>), Marouette ponctuée (<i>Porzana porzana</i>), Grèbe castagneux (<i>Tachybaptus rufficollis</i>), Fuligule milouin (<i>Aythya ferina</i>)...
Roselière inondée ou très humide	Blongios nain (<i>Ixobrychis minutus</i>), Rousserolle turdoïde (<i>Acrocephalus arundinaceus</i>), Héron pourpré (<i>Ardea purpurea</i>), Gorgebleue (<i>Luscinia svecica</i>), Busard des roseaux (<i>Circus aeruginosus</i>)
Roselière en voie d'assèchement	Busard cendré (<i>Circus pygargus</i>), Nette rousse* (<i>Netta rufina</i>), Canard chipeau* (<i>Anas strepera</i>), Hibou des marais (<i>Asio flammeus</i>), Rousserolle verderolle (<i>Acrocephalus palustris</i>)

* en bordure de plan d'eau

- les petites roselières (moins d'un ha) formant par exemple des franges le long des berges de plans d'eau ou de fossés ;
- les roselières de taille moyenne (1 à 5 ha) ;
- les roselières assez grandes (5 à 20 ha) qui constituent un minimum pour plusieurs espèces remarquables ;
- les grandes roselières (+ de 20 ha) généralement de très grand intérêt écologique.

L'humidité

Le roseau est une espèce plutôt tolérante vis-à-vis des niveaux d'eau. De ce fait, on peut trouver des roselières dans des sols d'humidité différente. On en distinguera trois :

- la roselière toujours inondée, même à l'étiage (10 à 25 cm d'eau) : comme il s'agit pour le roseau de l'optimum hydrique, cette roselière est souvent dense et n'abrite guère d'autres espèces végétales en son sein (d'où l'intérêt d'y créer des ouvertures : chenaux, clairières aquatiques) ;
- la roselière très humide, se situe environ au niveau moyen de la nappe ; fréquemment inondée, elle subit une exondation lors des périodes d'étiage ; cette zone est souvent soumise au batillage, que le roseau ne supporte que moyennement bien : cette roselière est donc souvent moins nettement dominée par le phragmite et elle est plus riche en autres espèces végétales : Iris d'eau (*Iris pseudacorus*), Lysimachie commune (*Lysimachia vulgaris*), Rubaniers (*Sparganium sp.*), Patience d'eau (*Rumex hydrolapathum*)...
- la roselière en voie d'assèchement (= d'atterrissement) est un stade d'évolution normale pour les roselières car elles ont un fort

Photo 86. (à gauche)
Exemple de roselière colonisant les berges d'une gravière (Écosphère – R. Eve).

Photo 87. (à droite)
Exemple de roselière de quelques hectares se développant sur des dépôts de fines de décantation (CNC - M. Vaslin).

pouvoir de fixation des sédiments et leur propre litière contribue également à rehausser leur niveau ; cette formation n'est inondée qu'en période de crue ; là aussi, le roseau étant moins vigoureux, il accepte la concurrence d'autres espèces qui sont celles des mégaphorbiaies : Eupatoire chanvrine (*Eupatorium cannabinum*), Épilobe hirsute (*Epilobium hirsutum*), Salicaire (*Lythrum salicaria*)...

La structure

La structure de la roselière correspond un peu à son architecture interne ; cet agencement spatial dépend beaucoup de l'âge, de la gestion et de l'entretien. C'est ainsi que les roselières présentent une gamme de structure variant entre deux pôles extrêmes :

- la roselière dense (peu ou pas d'ouvertures), homogène (toutes les tiges sont d'une même classe d'âge), monospécifique ; pauvre au plan végétal, cette roselière est en revanche appréciée de la plupart des oiseaux nicheurs caractéristiques de la roselière qui y trouvent un abri sûr et des tiges solides (paramètre important pour les grosses espèces) : Blongios nain (*Ixobrychus minutus*), Rousserolle turdoïde (*Acrocephalus arundinaceus*), Héron pourpré (*Ardea purpurea*), Panure à moustaches (*Panurus biarmicus*)... Il faut cependant noter que même ces espèces ont besoin de milieux complémentaires ouverts (aquatiques ou terrestres) et apprécient l'écotone roselière / eau.
- la roselière présentant une forte structuration tridimensionnelle : plusieurs générations de tiges de roseaux avec par exemple de jeunes pousses mêlées à des tiges cassées, différentes strates de végétation, des ouvertures aquatiques ou terrestres permettant le développement d'autres espèces végétales... Ce

type de roselière est plus riche que le précédent en espèces végétales et en invertébrés ; il accueille également de nombreux oiseaux nicheurs (passereaux, rapaces, canards...), moins strictement inféodés à ce type de milieu cependant.

5.5.2. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'AMÉNAGEMENT DES ROSELIÈRES

Les roselières constituent des habitats de grand intérêt écologique tant fonctionnel que biologique. Elles sont l'un des milieux de zones humides les plus importants.

Rôle fonctionnel

Les massifs de roseaux sont des pièges à sédiments d'une grande efficacité. Ceci leur confère un rôle important dans la lutte contre l'érosion au sein des plaines alluviales. Par ailleurs, les sédiments fixant une partie importante des polluants, les roseaux concourent au piégeage de composés toxiques ou de métaux lourds. La roselière est d'autre part dotée d'une haute capacité de rétention des nutriments ; elle contribue de façon essentielle au potentiel d'auto-épuration des zones humides et plans d'eau. Les phosphates sont précipités et fixés, tandis que les nitrates sont dénitrifiés en grande quantité dans la zone des racines.

Notons également que dans le cycle global de la matière organique des plaines alluviales ou des lacs, les roselières constituent un haut lieu de production et de recyclage. En effet, la litière (débris de tiges et feuilles) est peuplée de nombreuses bactéries et champignons, tandis que les tiges sont le siège de la reproduction de spongiaires, d'insectes, de crustacés... Cette productivité de base attire de nombreux décomposeurs et consommateurs secondaires.

Rôle biologique

Comparables en ceci aux forêts, les roselières constituent un habitat complexe qui entre dans la biologie de nombreuses espèces à différents titres :

- la roselière et ses interstices aquatiques ou terrestres constituent des lieux remarquablement bien abrités pour de nombreuses activités animales (nidification, repos, mue, alimentation, camouflage...) ;
- les tiges permettent l'arrimage de nids au-dessus des eaux (fauvettes aquatiques, rat des moissons...) ; elles abritent également les pontes de très nombreux invertébrés ;
- les interstices permettent d'édifier des nids flottants ou terrestres discrets ;

Écologie du Roseau commun (*Phragmites australis*)

Le roseau a une écologie assez souple et bien connue car l'espèce a été beaucoup étudiée.

1) Granulométrie du substrat : il apprécie de nombreux sols, ne fuyant que les sols très argileux ou inversement à granulométrie très grossière (il faut alors prévoir de régaler des terres plus fines) ; les sols à texture très fine sont plus volontiers colonisés par les massettes ;

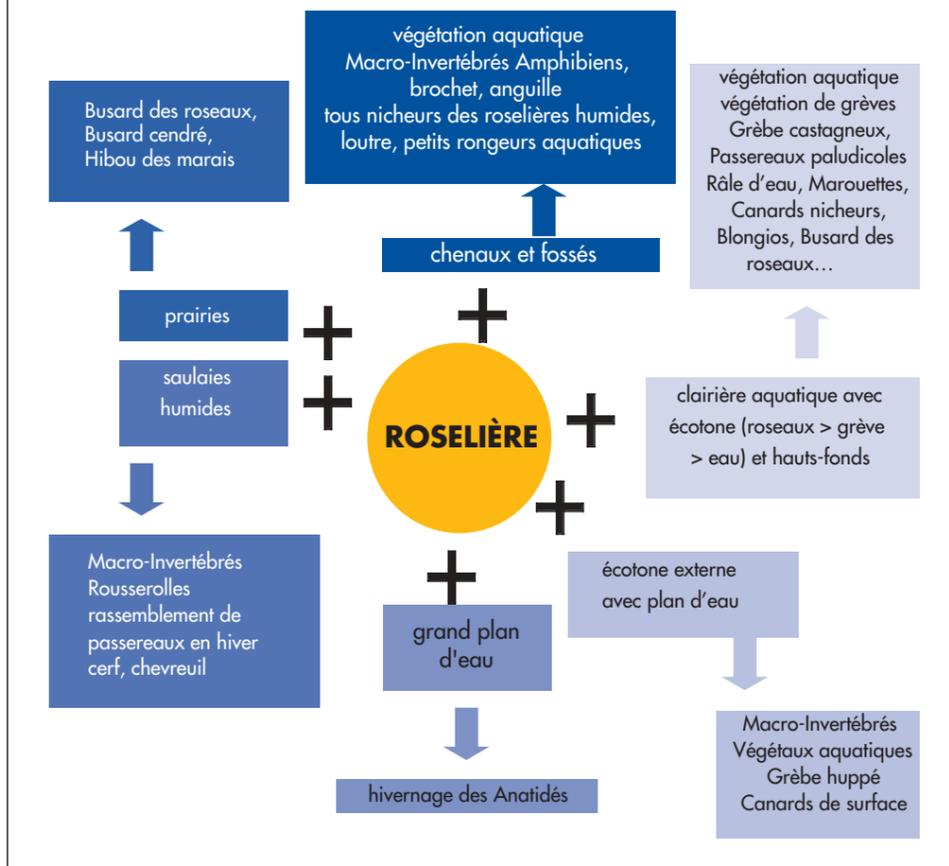
2) Richesse nutritive du sol : il tolère une grande gamme de niveaux nutritifs mais croît mal sur les sols oligotrophes ; sa croissance est optimale sur des sols eutrophes ; ses exigences sont plus fortes en azote qu'en phosphore. Ceci explique son efficacité dans l'épuration des eaux chargées en nitrates.

3) Acidité du sol : le roseau supporte pratiquement n'importe quel pH (observé de 3,6 à 7,5) ; aux pH basiques, les massettes sont plus compétitives.

4) Hydrologie : l'espèce supporte des niveaux d'eau assez variables surtout lorsqu'elle est bien établie ; on peut la trouver dans des milieux simplement humides (nappe à plus d'un mètre de profondeur à l'étiage), tandis qu'elle peut être recouverte sous 3 à 4 m d'eau (hors période de végétation) ; cependant l'optimum est de 10 à 25 cm d'eau en période d'étiage et l'espèce n'apprécie pas un fort batillage ; bien que l'espèce soit tolérante à la pollution, les biocénoses remarquables qu'elle supporte le sont nettement moins.

5) Salinité : le roseau est halotolérant⁽³³⁾ (jusqu'à 20 ‰).

Fig. 88. – Complémentarités écologiques des roselières avec d'autres habitats.



- la roselière est une importante source de nourriture pour de nombreuses espèces d'oiseaux : graines, invertébrés, frai et alevins... lorsqu'elle est de taille suffisante et qu'elle comporte des ouvertures aquatiques et des vasières, il s'agit d'un lieu de passage migratoire ou de stationnement hivernal particulièrement accueillant ;

- les ouvertures au sein des roselières ménagent des franges ou écotones d'intérêt particulier pour des espèces semi-aquatiques pionnières des roselières, ainsi que pour les amphibiens ou le frayage des poissons.

La roselière est un milieu qui prend toute sa valeur écologique quand elle est associée à d'autres habitats, soit internes, soit externes.

5.5.3. LE RÔLE DES ROSELIÈRES DANS LA BIODIVERSITÉ

L'intérêt patrimonial des roselières, c'est à dire la quantité d'espèces qu'elles abritent, en particulier la quantité d'espèces menacées, est considérable.

Plus d'un millier d'espèces d'invertébrés dépendent complètement du roseau pour leur survie. Certaines, dépendantes non seulement du roseau mais de l'habitat "roselière" sont des raretés : il s'agit en particulier d'Odonates (libellules), de Lépidoptères (Papillons), de Coléoptères et d'Araignées.

Les roselières sont assidûment fréquentées par des espèces de poissons d'intérêt comme l'anguille ou le brochet.

En ce qui concerne les Amphibiens, il n'y pas d'espèces strictement inféodées aux roselières cependant la Rainette verte (*Hyla arborea*) fréquente régulièrement les roseaux.

C'est sans doute le groupe des oiseaux qui présente le plus d'espèces remarquables nichant exclusivement ou préférentiellement dans les roselières : Blongios nain, Butor étoilé, Héron pourpré, Locustelle lusciniotide, Rousserolle turdoïde, Rousserolle effarvate, Panure à moustaches, Mésange rémiz, Lusciniote à moustaches...

Les roselières en tant que telles, souvent monospécifiques ne présentent pas un grand intérêt floristique. Ce sont leurs bordures au contact avec les eaux peu profondes qui sont en revanche intéressées.

santes. On peut y trouver un certain nombre d'espèces remarquables, du même type que celles évoquées pour les ceintures d'hélophytes.

5.5.4. L'AMÉNAGEMENT DES ROSELIÈRES SUR CARRIÈRE

Les substrats favorables

En dehors des sols totalement argileux et des sols très grossiers, les roselières peuvent être implantées sur une large gamme de substrats, y compris des sols acides, des sols tourbeux, des sols moyennement productifs. Cependant, il s'agit là de tolérances propres au roseau lui-même ; suivant les types de substrat, il ne sera pas accompagné des mêmes espèces.

Lorsque le substrat est très grossier, c'est à dire composé d'une grande proportion de cailloux, on pourra ajouter des terres plus fines (argiles, terre végétale...) pour favoriser l'implantation d'une roselière.

Par ailleurs, lorsque la zone où doit être implantée la roselière a été tassée (par le roulement des engins de chantier si par exemple, il y a eu un rabattement de nappe), on veillera à pratiquer un décompactage au ripper, sinon le roseau risque d'avoir des difficultés à prendre. Attention à prévoir ce décompactage avant la remontée des eaux.

Les niveaux piézométrique et topographiques

Le contrôle du niveau hydrique est particulièrement important dans le cas des roselières.

Une roselière largement inondée en hiver (sous un maximum de 1 m d'eau) et restant partiellement inondée en été (maximum 25 cm) constitue l'optimum pour les espèces animales de la roselière. Cependant, l'exondation estivale

permet une plus grande diversification au niveau floristique. Par ailleurs, des niveaux d'eau plus faibles en hiver (5 à 30 cm) favorisent la recherche alimentaire d'espèces hivernantes. Le Butor étoilé par exemple, espèce nicheuse des roselières, très localisée, est en revanche plus fréquent et plus dispersé en hiver, époque à laquelle il recherche également des roselières. Sa présence, sur carrière, peu probable en période de nidification est possible en hiver.

Enfin, il faut savoir que l'inondation estivale sous environ 1 m d'eau, favorise le roseau au détriment de ses concurrents : il est alors plus vigoureux (c'est la technique utilisée lorsque le roseau est cultivé pour le chaume).

Quand on peut difficilement jouer sur le niveau d'eau, il faut compenser ce manque en prévoyant des niveaux topographiques très variés, qu'il s'agisse de la pente générale ou des micro-variations du substrat. La technique de la « tôle ondulée » (alternance de creux et de bosses) est particulièrement adaptée pour les roselières.

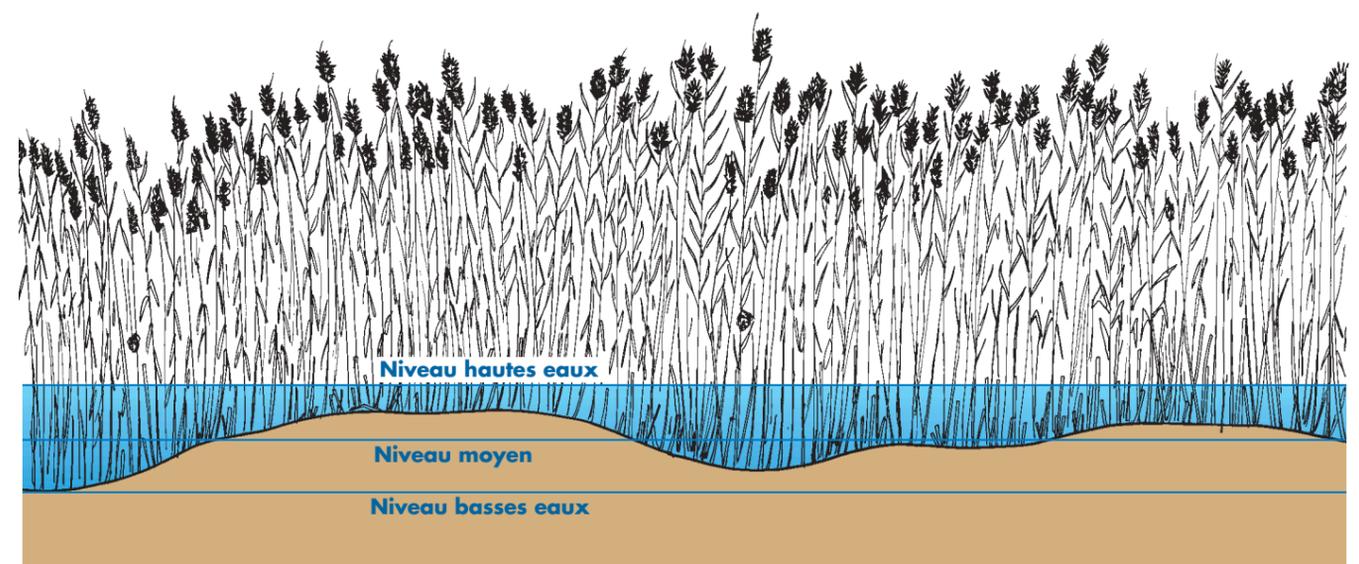
L'organisation spatiale de la roselière

Les roselières assez grandes (plusieurs ha) sont indispensables à l'accueil du Blongios nain ou de la Rousserolle turdoïde, tandis que des espèces comme le Héron pourpré ou le Butor étoilé exigent au moins 20 ha. Cependant les vastes roselières homogènes sont beaucoup moins remarquables que celles qui sont interpénétrées avec des habitats aquatiques (chenaux, clairières aquatiques).

⇒ les chenaux

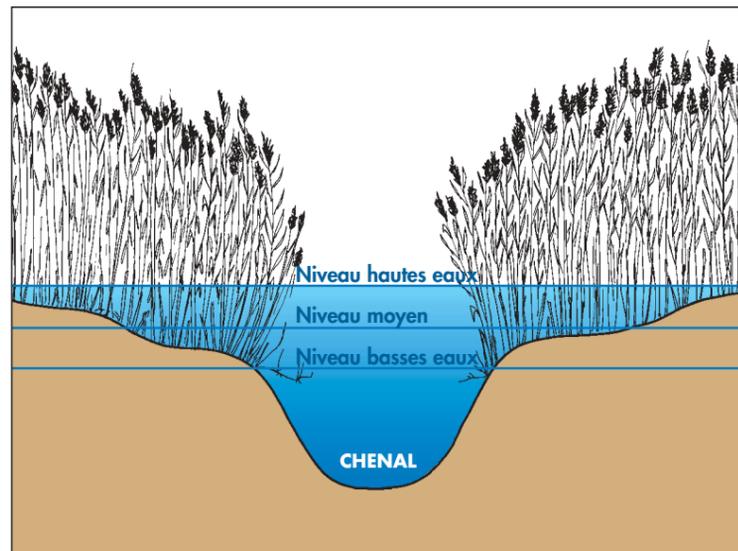
Lorsqu'elle atteint une certaine superficie (disons environ 1 ha), il est utile d'organiser la roselière en unités d'environ un quart d'hectare, séparées par

Fig. 89. – Coupe schématique d'une roselière. On notera les irrégularités du sol et l'inondation hivernale (dessin : M. Pajard).



(33) C'est-à-dire qu'il supporte des eaux saumâtres.

FIG. 90.-
L'aménagement de chenaux au sein des roselières présente de nombreux avantages écologiques. On remarquera que la partie centrale du chenal est suffisamment profonde pour empêcher sa colonisation par les roseaux (dessin : M. Pajard).



des chenaux de 2 à 4 m de largeur et de 1 à 2 m de profondeur. Ces chenaux facilitent la pénétration par les oiseaux d'eau au sein du massif de roseaux. Ils présentent d'ailleurs des intérêts divers :

- multiplication de la frange roselière / eau, dont le rôle et l'intérêt biologique sont importants ;
- contrôle de la prolifération des roseaux vers d'autres zones ;
- les roselières ainsi découpées s'avèrent les plus riches pour l'avifaune aquatique spécialisée ;
- la présence de fossés en eau, maintient une bonne humidité de la roselière même en période d'exondation ;

- les fossés ont eux-mêmes un intérêt (connexion des milieux, invertébrés, plantes aquatiques...).

⇒ les clairières aquatiques

Les clairières aquatiques multiplient l'intérêt écologique des roselières : abri, allongement de la frange terre / eau... Il est conseillé d'associer à ces clairières des hauts-fonds et des vasières.

La superficie de ces clairières et globalement la proportion du milieu aquatique dépend des objectifs. Pour attirer les oiseaux nicheurs « phares » de la roselière (Butor étoilé, Héron pourpré, Busard des roseaux...), il est préférable que la proportion de milieux aquatiques ne dépasse pas 20 %. Pour attirer les canards nicheurs, il est conseillé de prévoir un grand espace aquatique au sein de la roselière.

Lorsqu'on souhaite qu'elles soient peu profondes (vasières...), ces clairières risquent malheureusement souvent d'être colonisées par le roseau. Pour éviter ou du moins ralentir le phénomène, on prendra les précautions suivantes :

- isoler la clairière aquatique de la roselière par des chenaux de 2 à 4 m de largeur pour 1 à 2 m de profondeur ;
- si les travaux d'aménagement sont réalisés à sec, tasser les matériaux avec des engins de chantier.

Si on dispose de matériaux de forte granulométrie (pierres, cailloux...), on pourra les épandre sur la clairière ou du moins en périphérie, le roseau se développant mal sur de tels substrats.

FIG. 91.- Coupe schématique dans une "clairière" aquatique aménagée au sein d'une roselière. La clairière est cernée par un fossé destiné à empêcher l'extension des roseaux (dessin : M. Pajard).

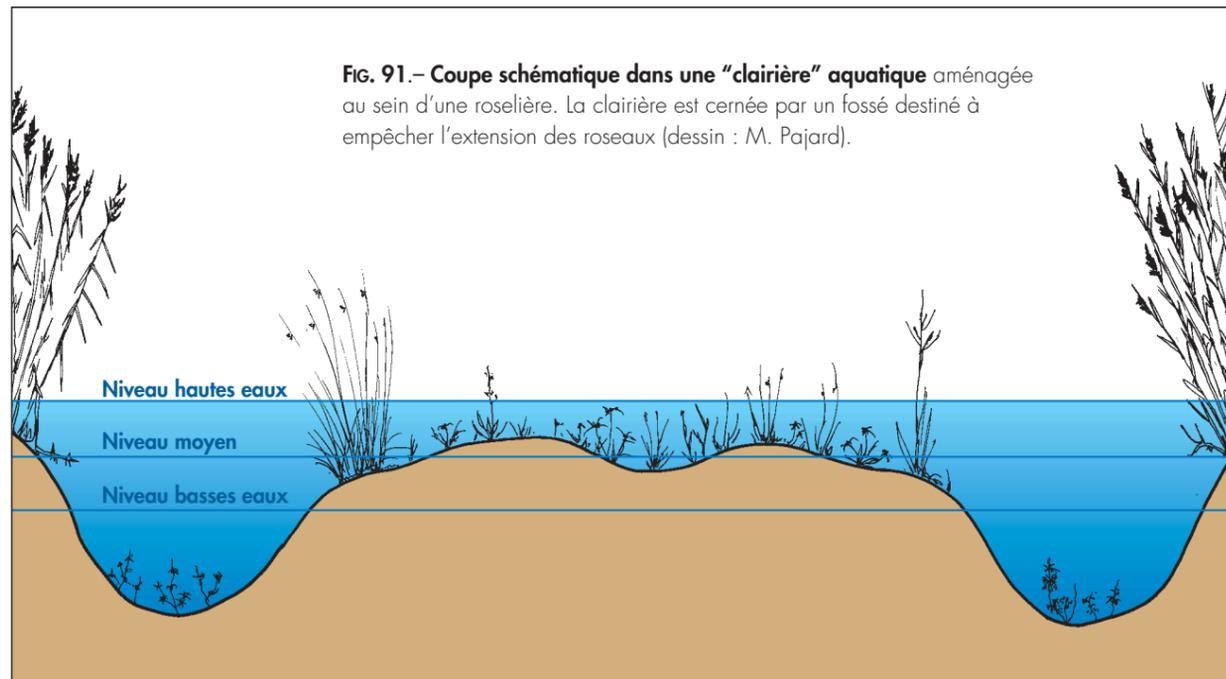


PLANCHE IX - X.

(M. Courcoux). Cette roselière aménagée en queue d'étang est inondée en période de hautes eaux et exondée à l'étiage. La formation couvre une superficie assez importante, ce qui permet l'accueil d'oiseaux nicheurs exigeants comme le Blongios nain ou la Rousserolle turdoïde. Des chenaux et au premier plan, une clairière aquatique ont été aménagées afin d'augmenter le linéaire de berge et la longueur de l'écotone roselière/milieu aquatique, particulièrement riche biologiquement.





Photo 88. Un roseau "racines nues" (Écosphère – M. Pajard).

Les techniques d'introduction du roseau

D'assez nombreuses expériences ont été menées sur l'implantation du roseau (contrairement aux autres hélrophytes) utilisant différentes techniques. Le tableau XXII résume les connaissances acquises vis-à-vis des principales méthodes d'introduction du roseau.

Si un massif de roseau existe en limite du site, on peut favoriser son expansion naturelle. Dans ce cas, on crée les conditions propices au développement du roseau. On peut essayer d'accélérer le processus en utilisant la méthode de multiplication du roseau par marcottage : les tiges sont inclinées de façon à enfoncer des nœuds dans le sol ; l'opération est à réaliser en été.

Photo 89. Repiquage d'une motte de roseau adulte (Écosphère – M. Pajard).



TABLEAU XXII.– Principales méthodes utilisées pour planter le Roseau commun (*Phragmites australis*)

modifié et complété d'après MERRITT A. (1994)

Mode d'implantation	Saison optimale	Avantages	Inconvénients	Conseils
graines nues	avril à mai	manipulation facile	1) faible viabilité 2) exigent un niveau d'eau très précis 3) peu de fournisseurs	semer environ 0,1 à 1 g/m ² (1 g = 10 000 graines) sur sol nu humide. 5-6 semaines après germination monter très progressivement le niveau d'eau pour tuer les plantes terrestres, en suivant la croissance des plants sans les recouvrir complètement
plantes en racines nues	avril à mai après les gelées	manipulation facile	1) sensibilité aux rongeurs 2) jeunes sujets peu tolérants aux inondations	implanter sur sol humide. 1 à 4 pl/m ² produit un développement satisfaisant en 1 an. monter graduellement le niveau d'eau avec la croissance des plants sans les recouvrir complètement.
plantes en godets	avril à mai après les gelées	manipulation facile	1) onéreux bien que les coûts baissent avec des plants mini-mottes 2) jeunes sujets peu tolérants aux inondations	
fragments de tige	mai à juin	1) faciles à récolter sur des roselières gérées 2) manipulation facile	1) possible dérangement au site donneur 2) exigent un transfert rapide	prélever un fragment apical de 60 cm planter en eau peu profonde. 10-15 tiges/m ² donne un bon recouvrement après 1 an.
fragments de rhizomes	février à avril	réalisable hors période de nidification	1) contrôle du niveau d'eau critique 2) collecte manuelle difficile et fastidieuse 3) collecte mécanisée facile mais qui peut être perturbatrice pour le milieu donneur	les fragments doivent avoir 1 ou 2 nœuds. planter dans 4 cm de sol humide, avec des parties de rhizome émergeant. monter graduellement le niveau d'eau avec la croissance des plants sans les recouvrir complètement.
sol contenant des rhizomes	février à avril	1) réalisable hors période de nidification 2) introduction possible de la communauté invertébrée associée 3) récolte rapide ne requérant pas de compétence spéciale (triage, etc...)	1) peut nécessiter le surcreusement d'un réceptacle 2) déplacement et plantation exigent du matériel lourd 3) coûts de transport croissant rapidement avec le volume 4) possibilité d'introduction de plantes indésirables 5) technique encore peu expérimentée ayant donné des résultats contrastés	répandre au moins 25 cm de sol et le garder humide sans inonder avant l'apparition de pousses puis monter graduellement le niveau d'eau avec la croissance des plants sans les recouvrir complètement le sol.
déplacement de mottes avec plantes adultes	printemps ou automne	1) tolérance aux variations du niveau d'eau 2) timing plus souple	exigent un matériel lourd pour creuser et planter	une densité de 1 plant / 10 m ² donne de bons résultats. s'assurer que les racines sont correctement déplacées. planter à bonne profondeur
nappe préensemencée	juin	1) installation facile 2) maintien en place des graines 3) limitation des phénomènes d'érosion	1) exige un positionnement très précis par rapport au niveau d'eau 2) coût encore élevé 3) technique expérimentale dont l'efficacité en particulier en hiver est encore mal connue.	à réserver : pour des superficies modérées pour enclencher une dynamique naturelle favorable au roseau pour des berges en pente assez forte
nappe pré-cultivée	juillet	1) stade délicat de la germination réalisé hors-sol 2) positionnement moins strict par rapport au niveau d'eau 3) implantation d'une nappe déjà reverdie : impact paysager positif	1) manipulation difficile à cause du poids élevé de la nappe 2) coût élevé 3) risques de dessèchement et d'échauffement des jeunes plants pendant le transport et la manipulation.	



Photo 90. Mise en place le long d'un chenal de nappes pré-ensemencées de roseaux (Écosphère – V. Leloup).

5.5.5. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES ROSELIÈRES

Signalons d'abord que dans le cadre d'un site à vocation écologique, toute intervention sur une roselière doit se faire par rotation, c'est à dire au moins sur deux années. Ceci se justifie entre autres par l'existence d'invertébrés spécialisés dans les roselières, qui sont à la base des chaînes alimentaires et sont d'une grande sensibilité.

Entretenir une roselière

Une roselière convenablement inondée est un milieu très pérenne. Cependant, un des problèmes majeurs rencontrés par les roselières est leur atterrissement progressif. En effet, la production de litière atteint dans ce milieu 1 m en 20 ans, sans compter l'accumulation des sédiments piégés. Cet exhaussement progressif favorise l'implantation des saules, qui deviennent rapidement envahissants et « étouffent » la roselière. On peut freiner cette progression en faucardant périodiquement, en hiver pour éviter la destruction de nids et en exportant les produits de la coupe. Pour un entretien à vocation écologique, on ne dépassera pas un faucardage tous les 3 ans. Le faucardage peut s'effectuer depuis la rive, quand il n'y a pas trop d'eau ou depuis la berge avec des bateaux spéciaux (= bateaux faucardeurs). Si on ne peut faucarder en hiver (roselière trop inondée), on interviendra le plus tard possible, c'est à dire juste avant la remontée des eaux.

Une solution radicale mais onéreuse consiste à retirer la litière excédante par des moyens mécaniques.

Contenir la roselière

Lorsqu'il a trouvé un milieu qui lui convient, le roseau devient facilement envahissant. Ceci peut être préjudiciable à la diversité du site et le roseau peut envahir des milieux terrestres ou aquatiques que l'on souhaite laisser ouverts.

Il existe différentes techniques utilisées pour contrôler les roseaux. Celles qui peuvent être envisagées dans le cadre d'une zone humide créée sur carrière sont présentées.

Le brûlage est efficace mais demande évidemment de grandes précautions (d'où l'avantage d'organiser la roselière en unités séparées) ; le résultat se traduit par une forte élimination de matières organiques ; le brûlage se pratique au début du printemps ou à la fin de l'été ; si le feu arrive à couvrir dans la litière, le roseau peut être totalement éliminé ; la méthode n'est pas très onéreuse (quelques centaines de F/ha). Mais souvent, le roseau finit par réapparaître. Le brûlage est une technique préalable utile lorsqu'on souhaite ensuite entretenir la roselière (exondée en été) par pâturage.

Le faucardage d'été ne parvient à limiter les roseaux que s'il est pratiqué pendant 2 à 3 ans ; même ainsi le roseau réapparaît au bout de 5 ans ; cette technique est favorable à la biodiversité végétale.

Le faucardage d'hiver, qui est préférable pour la faune, stimule la production de macro-invertébrés, mais à la repousse, la roselière est densifiée ; afin de ralentir le processus de comblement de la roselière, il faut retirer les produits de la coupe.

La destruction du système racinaire demande des tracteurs équipés de roues doubles ou triples ; elle coûte cher et n'est efficace que suivie d'une mise en eau ou d'un pâturage.

La manipulation des niveaux d'eau quand elle est possible permet de contenir la roselière ; bien qu'il puisse supporter jusqu'à 4 m d'eau, le roseau ne supporte normalement pas plus d'un à deux mètres d'eau durablement pendant la période de végétation. A noter cependant, qu'il s'agit d'un des hélrophytes les plus résistants à l'inondation et qu'en éliminant le roseau on fera disparaître beaucoup d'autres espèces.

Le pâturage extensif par des animaux rustiques, comme les bovins Highlands Cattle ou les Chevaux de Camargue, est possible. Différentes expériences en cours montrent que ce mode de gestion (qui rencontre de plus la sympathie du public) permet de contenir la prolifération des roseaux.

TABLEAU XXIII. – Différents effets du faucardage d'hiver pratiqué en rotation, selon la fréquence. D'après G. TYLER (RSPB) In HAWKE C.J. & JOSÉ P.V. (1996).

Effets (+ = minimal/ +++ = maximal)	Fréquence d'intervention			
	Annuelle	2 ans	3-5 ans	7-15 ans
Limitation des ligneux	++++	++++	+++	+
Maintien de la vigueur du roseau	+++	++++	++	+
Réduction de l'accumulation de litière	++++	+++	++	+
Densification des tiges	++++	+++	+++	++
Accroissement de la production de graines	+++	++++	++++	++
Bénéfices pour la faune	+ / ++	+++	++++	++++

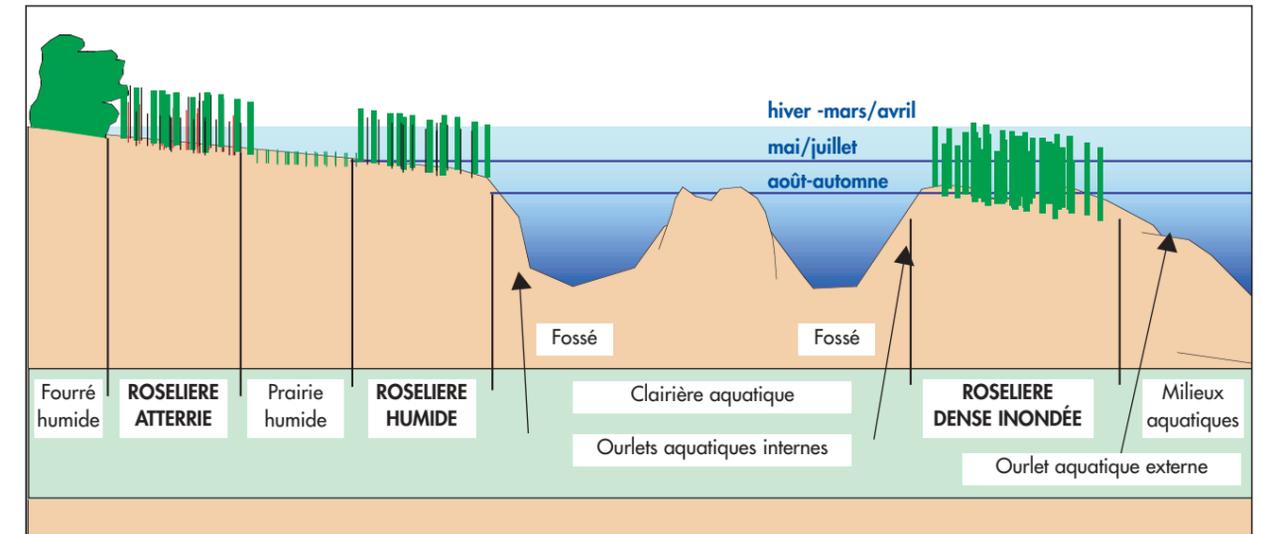


FIG. 92. – Différents types de roselières et leurs milieux associés en fonction du niveau d'inondation et du mode de gestion.

5.6. Les prairies

D'un point de vue géographique, une prairie est une formation herbeuse dominée par les graminées. Pour les agronomes, il s'agit d'une surface couverte de plantes herbacées qui fournit un fourrage au bétail. Dans ce chapitre, on traite des prairies au sens écologique, qui n'est pas éloigné de la définition agronomique, mais se fonde sur la composition floristique plutôt que sur la production pour l'élevage. Il s'agit non seulement des prairies au sens des pâturages ou prés de fauche, mais aussi d'une végétation gérée extensivement dont la hauteur

atteint 30 cm à 1 m. Lorsqu'il n'y a plus de gestion, ces prairies se transforment en formations végétales à hautes herbes que les botanistes appellent mégaphorbiaies.

Le contexte de ce guide est celui de carrières aménagées principalement en zones humides, c'est pourquoi on insistera plus sur les prairies humides (hygrophiles à mésohygrophiles) que sur les prairies plus sèches (mésophiles). Les prairies naturelles sont en forte régression depuis les débuts de l'intensification des pratiques agricoles. Il n'est donc jamais inutile de saisir l'occasion d'en recréer.

Photo 91. Deux types de végétation prairiale sur un ancien site de carrière. Au premier plan prairie inondée à joncs (jonçaie) sur des fines de décantation, au second plan, pâturage mésohygrophile sur des remblais (Écosphère – F. Le Bloch).



5.6.1. LES PRINCIPALES DONNÉES À CONSIDÉRER POUR L'AMÉNAGEMENT D'UNE PRAIRIE

En dehors de la localisation géographique qui joue un grand rôle dans le type de prairie que l'on peut créer (prairies atlantiques, prairies montagnardes, prairies continentales...), les principaux paramètres à considérer sont présentés ci-dessous.

Le niveau hydrique

Pour réaliser une prairie humide, il faut que la nappe se situe, en période de végétation, entre 0,5 m et 1,5 m sous le terrain naturel (lorsque la capillarité est mauvaise comme dans le cas de sols très sableux, il ne faut guère descendre au-dessous de 1 m de profondeur). Au-delà on passe insensiblement à la prairie mésophile. Inversement, si le sol est trop longtemps inondé (au printemps et jusqu'en été), la végétation prairiale est inhibée. Dans le cas de sols engorgés en permanence, on ne peut créer de prairies que sur des substrats très riches en matières organiques, du type paratourbeux.

Dans le cas de conditions hydriques favorables, on retiendra trois grands types de prairies humides :

- 1) la prairie hygrophile sur alluvions minérales, inondée l'hiver, avec une nappe proche du sol même à l'étiage ;
- 2) la prairie mésohygrophile sur alluvions minérales, peu ou pas inondable en hiver, avec une nappe aux alentours de 1 m de profondeur à l'étiage ;
- 3) la prairie paratourbeuse avec une nappe peu fluctuante et une importante couche d'humus pratiquement toujours gorgée d'eau, sauf éventuellement superficiellement en été.

(34) Si elles sont utilisées pour l'élevage même de manière très extensive, les agronomes en revanche les nomment aussi des prairies.

Les caractéristiques du sol

Le substrat sur lequel doit être établie la prairie est essentiel. Les principaux paramètres à considérer sont :

- 1) la richesse nutritive du sol.
- 2) le type de sol selon sa granulométrie et son taux de matière organique (sol sableux, sol battant, sol lourd, sol franc et équilibré, sol tourbeux, sol humifère...).
- 3) le pH (sol alcalin, neutre, légèrement acide, acide).

La prairie est par définition un milieu devant assurer une productivité suffisante pour supporter un prélèvement régulier de biomasse par la fauche ou le pâturage. On ne peut donc créer des prairies que sur des sols riches (= eutrophes) à moyennement riches (mésotrophes). Sur les sols oligotrophes (sols sableux, sols très acides, sols sans matière organique...), les formations herbacées nettement moins productives sont appelées des pelouses par les botanistes⁽³⁴⁾. D'un point de vue granulométrique, les sols les plus favorables aux prairies sont des sols argilo-limoneux à argilo-sablo-limoneux (sols francs et équilibrés) présentant une couche de terre végétale.

5.6.2. LE RÔLE DES PRAIRIES DANS LA BIODIVERSITÉ

Les prairies humides qui souffrent non seulement de la régression des prairies en général, mais aussi de celles des milieux humides, constituent un habitat devenu rare et de très grand intérêt écologique. En particulier celles qui sont peu ou pas améliorées (par des amendements, engrais, herbicides sélectifs...) sont devenues rarissimes en Europe de l'Ouest. De nombreux groupes animaux y sont bien représentés :

- les Invertébrés en général et les Insectes en particulier dont de nombreuses espèces peu répandues (en particulier parmi les Libellules, Papillons, Sauterelles et Criquets...);
- les Amphibiens ;
- les petits Mammifères et les Chauves-Souris qui apprécient particulièrement les prairies humides comme zones de chasse ;

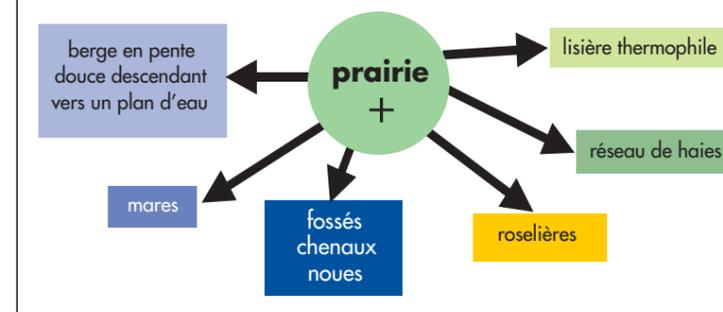
TABLEAU XXIV.- Conditions hydriques défavorables à la création d'une prairie humide.

Conditions	Formation à préférer
Nappe plus profonde qu'un mètre et demi en période de végétation	Prairie mésophile
Sol toujours engorgé et substrat minéral, trop pauvre en matière organique	Roselière
Inondations jusqu'en été	Vasières, platières

TABLEAU XXV.- Conditions de sol défavorables à la création d'une prairie

Conditions	Formation à préférer
Sol oligotrophe très acide (pH < 4)	Lande
Sol tourbeux très acide (pH < 4)	Lande humide
Sol très sableux	Pelouse sur sable
Sol oligotrophe calcaire, souvent caillouteux	Pelouse calcicole

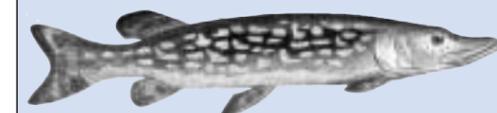
FIG. 93.- Quelques complémentarités classiques entre les prairies et d'autres habitats.



Les gravières peuvent participer à la reproduction du Brochet

Le Brochet (*Esox lucius*) est une espèce d'intérêt patrimonial du fait de la régression de ses sites de reproduction. C'est aussi une espèce de grand intérêt halieutique. Les zones de

donné. La période de frai peut s'étendre de 1 à 4 semaines. Lors de la décrue, les alevins rejoignent le lit mineur ; cependant, il est indispensable que les zones de frayères



restent inondées pendant au moins 1 mois après le pic de frai. Les facteurs défavorables à la reproduction du brochet sont en particulier :
 • l'excès de matières en suspension (MES) : colmatage des œufs, mortalité du plancton, diminution de la transparence des eaux limitant le développement des herbiers...

• les variations thermiques excessives entraînant une limitation de la fécondité et la mortalité des stades précoces.

• un déficit en oxygène (eaux stagnantes) augmentant la mortalité des stades précoces et la croissance des alevins.

• un drainage trop rapide en période de décrue (> 30 cm/s) nuisant à la dévalaison des alevins.

• une végétation trop clairsemée, l'espèce déposant ses œufs sur les végétaux, et inversement une végétation trop dense rendant l'accès difficile.

• les pollutions auxquelles l'espèce est particulièrement sensible.

On voit donc que malgré les exigences requises par le Brochet pour sa reproduction, il est tout à fait possible de créer sur des sites de gravières inondables des prairies qui lui soient favorables.

Photo 92. L'association entre prairies et fossés augmente l'intérêt écologique (Écosphère - M. Pajard).



- les rapaces, qui y trouvent un terrain de chasse privilégié (chouettes, faucons, busards...);
- des oiseaux palustres nicheurs, dont certains exclusifs de ce milieu : Courlis cendré, Râle de genêts...

Il faut bien sûr rappeler que le Brochet fraie de préférence dans des prairies humides inondées en hiver et au début du printemps. Des prairies favorables au Brochet peuvent être créées sur gravières. Les jeunes anguilles utilisent également les prairies inondables pour se nourrir.

En ce qui concerne l'intérêt floristique, il semble qu'il soit difficile de créer des prairies humides d'intérêt sur des sols artificiels. Les espèces végétales rares de prairies humides sont probablement liées à des sols complexes, soit au niveau de leur structure, soit au niveau de leur régime hydrique.

Les prairies mésophiles n'atteignent pas globalement l'intérêt des prairies humides parce qu'elles sont moins rares. Cependant, la problématique est la même. Ce sont celles qui font l'objet des pratiques agricoles les moins intensives qui sont les plus remarquables, en particulier pour leur flore : prairies fauchées ou pâturées extensivement, prairies peu amendées et non traitées...

Les prairies fleuries (non traitées contre les Dicotylédones) sont particulièrement riches en Lépidoptères (papillons). Elles peuvent également abriter divers oiseaux nicheurs intéressants (Alouette lulu, Traquet motteux, Tarier pâtre, Pies-Grièches...).

5.6.3. L'AMÉNAGEMENT DES PRAIRIES SUR CARRIÈRE

Pour optimiser la valeur biologique des prairies, quelques éléments sont à prendre en considération.

Conseils pour la conception

D'abord, il convient de leur donner une forme plutôt ramassée, les formes allongées ou contournées favorisant la prédation des lieux de nidification, en particulier par le renard. La proximité de l'eau est un atout favorable (par exemple pour les Anatidés), surtout si la transition avec celle-ci se fait par une pente douce. La protection contre le vent et un bon ensoleillement doivent également être préférés.

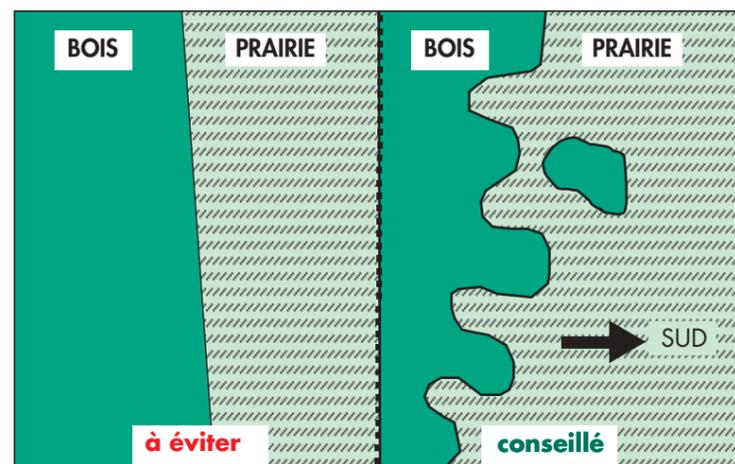
Un certain nombre de synergies entre prairies et autres habitats ont déjà été citées comme l'association prairies/mares qui est très efficace pour des groupes comme les Odonates, les Amphibiens et les oiseaux d'eau nicheurs ou non.

L'intérêt biologique (pour les invertébrés et les oiseaux nicheurs) des prairies est également augmenté par la présence d'arbres isolés, de bosquets ou de haies (comportant de préférence des espèces épineuses), ainsi que de lisières complexes, en particulier exposées au Sud.

La reconstitution du sol et la préparation du substrat

S'il est vrai que les sols pauvres sont défavorables, il est cependant recommandé de se contenter d'un sol moyennement fertile pour des prairies à vocation écologique. On évitera donc l'utilisation de terres végétales provenant de terres cultivées et on préférera celles découpées sur des milieux plus naturels. En effet, un

FIG. 94.-
Conception de la lisière entre une prairie et un boisement.



sol trop riche, surtout sur un site artificiel où les sols sont beaucoup manipulés, favorise l'envahissement par certaines espèces rudérales. D'ailleurs différentes études ont montré que dans les aménagements, les prairies peu productives présentaient une plus grande richesse spécifique que les prairies productives.

Il est intéressant de valoriser la présence de substrats différents qui peuvent permettre de reconstituer plusieurs types de prairies.

L'engorgement et la carence en oxygène étant défavorables aux prairies mésophiles, il peut être nécessaire de sous-soler, décompacter et procéder aux façons culturales adéquates (voir chapitre sur la végétalisation).

L'alimentation en eau des prairies humides

Lorsque les terrains sont perméables, les prairies humides ne peuvent être alimentées en eau que par la nappe alluviale si celle-ci affleure en période de hautes eaux. Si les terrains sont peu perméables à quelques décimètres sous le terrain naturel, d'autres types d'alimentation sont envisageables : débordement du plan d'eau riverain (éventuellement guidé jusqu'à la prairie par un chenal), système de fossés d'alimentation si l'on bénéficie d'un certain contrôle des niveaux d'eau... (attention car en terrain perméable les fossés risquent de se transformer en fossés de drainage en période d'étiage et d'entraîner un assèchement excessif).

TABLEAU XXVI.- Mélange d'espèces* classiques pour végétaliser une prairie humide (sol argilo-limoneux).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
ESPÈCES DOMINANTES (jonc et graminées)			
Agrostis stolonifère	<i>Agrostis stolonifera</i>	semences	semis
Fétuque faux-roseau	<i>Festuca arundinacea</i>	semences	semis
Jonc épars	<i>Juncus effusus</i>	racines nues godets (semences)	plantation (semis)
Jonc glauque	<i>Juncus inflexus</i>	racines nues godets (semences)	plantation (semis)
Vulpin des prés	<i>Alopecurus pratensis</i>	semences	semis
ESPÈCES COMPAGNES (Dicotylédones apportant une touche florifère)			
Achillée sternutatoire	<i>Achillea ptarmica</i>	godets (semences)	plantation (semis)
Pigamon jaune	<i>Thalictrum flavum</i>	godets	plantation
Populage des marais	<i>Caltha palustris</i>	godets	plantation
Reine des prés	<i>Filipendula ulmaria</i>	godets	plantation
Silène fleur-de-coucou	<i>Lychnis flos-cuculi</i>	godets (semences)	plantation (semis)

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

TABLEAU XXVII.- Mélange d'espèces* classiques pour végétaliser une prairie mésophile rustique (sol franc et équilibré).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
ESPÈCES DOMINANTES (graminées)			
Brome dressé ⁽³⁵⁾	<i>Bromus erectus</i>	semences	semis
Dactyle aggloméré	<i>Dactylis glomerata</i>	semences	semis
Fétuque des prés	<i>Festuca pratensis</i>	semences	semis
Fétuque faux-roseau	<i>Festuca arundinacea</i>	semences	semis
Fétuque rouge	<i>Festuca rubra</i>	semences	semis
Fléole des prés	<i>Phleum pratense</i>	semences	semis
Fromental	<i>Arrhenatherum elatius</i>	semences	semis
Pâturin des prés	<i>Poa pratensis</i>	semences	semis
ESPÈCES COMPAGNES (Dicotylédones apportant une touche florifère)			
Achillée millefeuille ⁽³⁶⁾	<i>Achillea millefolium</i>	semences	semis
Grande Marguerite ⁽³⁶⁾	<i>Leucanthemum vulgare</i>	semences	semis
Lotier corniculé	<i>Lotus corniculatus</i>	semences	semis
Luzerne minette	<i>Medicago lupulina</i>	semences	semis
Petite Sanguisorbe ⁽³⁶⁾	<i>Sanguisorba minor</i>	semences	semis

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

⁽³⁵⁾ Uniquement sur sol calcaire.

⁽³⁶⁾ Pour ces espèces, on fera attention à la provenance qui peut être douteuse.

La végétalisation

A priori, sur des sols non compactés, bénéficiant d'un drainage suffisant et d'une fauche annuelle, des formations prairiales se développent spontanément en 5 à 10 ans, les espèces prairiales éliminant progressivement les espèces vivaces des friches. Laisser faire la colonisation à l'avantage d'assurer une composition floristique conforme au biotope et si des sources de propagules se trouvent dans le secteur, on aboutit souvent à des formations ressemblant à celles des environs.

Mais un semis initial simple est cependant conseillé pour stabiliser le sol, éviter un envahissement par les espèces rudérales et catalyser les processus naturels. On préférera alors un mélange où dominent les graminées, pour leur pouvoir de fixation du sol. Les légumineuses ont souvent tendance à devenir envahissantes. L'entretien doit être rigoureux la première année ; pour la densification du couvert végétal, il est conseillé de passer le rouleau après la levée pour taller les graminées, puis de faucher en exportant les produits de la coupe.

On peut aussi envisager de diversifier un secteur engazonné de manière classique, donc pauvre en espèces, en y implantant des godets biodégradables contenant les espèces désirées.

Le déplacement

La transplantation d'une prairie déjà existante peut être envisagée, mais il s'agit d'une technique lourde et coûteuse qui ne se justifie que pour des milieux de grande qualité écolo-

gique. Il doit en particulier s'agir d'une prairie peu amendée ; en effet, la transplantation d'une prairie ayant connu des pratiques agricoles intensives (engrais, herbicides...) est la meilleure façon d'introduire des rudérales résistantes. On peut donner les conseils suivants :

- 1) le substrat de la zone réceptacle ne doit pas être compacté et son régime hydrique doit être semblable à celui du sol naturel.
- 2) pour éviter le développement d'espèces indésirables le site receveur doit être dépourvu de toute végétation.
- 3) les plaques à greffer peuvent faire 10 à 50 cm d'épaisseur (moins c'est épais, moins c'est cher).
- 4) le travail doit être fait de manière à minimiser les interstices entre les plaques, pour éviter le développement d'espèces opportunistes des friches.

Les autres techniques

Bien qu'on n'ait guère d'expériences à ce sujet, le transfert de litière de prairie existante est déconseillé compte tenu de la faible productivité en graines de nombre de prairiales. L'épandage de produits de la fauche d'une prairie existante est une méthode donnant des résultats très variables. L'avantage est de pouvoir choisir son type de prairie et d'en garantir une origine locale.

Comment entretenir les prairies de façon écologique ?

1) Prairies de fauche plutôt productives : 2 coupes annuelles (été + automne).

2) Prairies de fauches peu productives : 1 coupe annuelle (été/automne).

3) Ne commencer la coupe que tardivement surtout en milieu humide (mi-juillet pour le Bassin Parisien).

4) Ne pas laisser l'herbe coupée sur place.

5) Prairies pâturées : pâturage extensif à prévoir en rotation afin de maintenir des parcelles de végétation à différentes hauteurs.

6) N'utiliser ni engrais, ni désherbants.

5.6.4. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES PRAIRIES

Les prairies doivent par définition faire l'objet d'un entretien, même si celui-ci est extensif et n'est pas nécessairement annuel. Un entretien léger (rotation des secteurs entretenus) est même conseillé dans la mesure où il laisse persister des secteurs de végétation plus haute (mégaphorbiaies, haute friche) : cette diversité de hauteur dans la végétation herbacée est très appréciée de nombreuses espèces animales.

Les deux méthodes classiques d'entretien sont la coupe et le pâturage.

Le fauchage

Le fauchage a la réputation de favoriser la diversité spécifique végétale. Ceci tient d'ailleurs en partie au fait que les prairies de fauche sont le type de surface herbeuse qui a le plus régressé. Mais toutes les prairies de fauche ne sont pas remarquables, en particulier sur sol riche.

Sur des sols plutôt riches, où la productivité est importante, on pratiquera deux coupes par an pour favoriser la diversification en espèces végétales. Sur des sols plus pauvres, une seule coupe par an permet une bonne limitation de la biomasse. Pour toutes les prairies de fauche, l'exportation du foin coupé favorise les espèces prai-

riales par rapport aux espèces de friches. La première ou unique coupe ne doit pas être trop précoce afin de laisser fructifier les plantes et de ne pas mettre en péril des nichées d'oiseaux. La reproduction de nombreuses espèces végétales et animales, surtout de zones humides, est mise en difficulté par les usages agricoles actuels qui entraînent une fauche précoce. Pour des prairies de fauche humides, on prévoira donc de faucher vers la mi-juillet.

Le pâturage

En ce qui concerne les pâturages, il est vrai qu'ils sont connus pour être généralement pauvres au plan végétal. Mais il s'agit alors de pâturages intensifs, bien souvent fertilisés et amendés. Les pacages extensifs, en revanche, maintiennent certains milieux de grand intérêt comme les pelouses calcaires et les prairies humides sur sol peu fertilisé.

Dans tous les cas, l'entretien extensif en prairie pâturée constitue une gestion patrimoniale particulièrement favorable à la faune. Cette gestion consiste en un pâturage léger et ce en rotation. Il est en effet important pour la faune (Invertébrés, Amphibiens, canards nicheurs...) de maintenir des zones herbeuses hautes ainsi que des touffes d'herbes et des refus.

Photo 93. Prairie très humide, favorable aux Anatidés, entretenue par des chevaux de race rustique (Écosphère - M. Pajard).



Photo 94. Mare bien végétalisée aménagée sur des stériles marneux imperméables. L'alimentation est uniquement météorique et la mare s'assèche en été. (Écosphère - M. Pajard).



Photo 95. Mares temporaires minérales peu végétalisées. Il s'agit du carreau d'une ancienne carrière de schistes (CNC - ENCEM).



5.7. Les mares

Les mares sont des plans d'eau peu profonds (2 m maximum), de petite taille qui peuvent rester en eau toute l'année ou bien s'assécher en été. Du fait d'une faible masse d'eau, toutes les modifications physiques ou chimiques y sont rapides : réchauffement, refroidissement, changement de pH...

5.7.1. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'AMÉNAGEMENT DES MARES

Les mares constituent des milieux qui ont beaucoup régressé. Nombre d'entre elles ont été comblées. Quant aux mares subsistantes au sein des espaces agricoles, beaucoup ont été eutrophisées.

Or les mares constituent un biotope de grand intérêt en particulier pour deux groupes faunistiques, à savoir les Amphibiens et les Invertébrés (Libellules en particulier). La présence de ces deux groupes est entre autre favorisée par l'absence habituelle de poissons dans les mares. Les végétaux aquatiques, les végétaux de grève ou les héliophytes qui sont susceptibles de s'y développer peuvent également comporter des espèces d'intérêt.

5.7.2. L'AMÉNAGEMENT DES MARES SUR CARRIÈRES

Avant d'envisager la création de mares, on peut vérifier si les travaux du chantier d'extraction n'ont pas laissé ici ou là, des dépressions où l'eau stagne naturellement. Il est alors intéressant de tirer profit de ce type de situation qui s'est créée spontanément. Ceci n'empêche pas des aménagements mais permet de disposer d'un milieu déjà partiellement étanche.

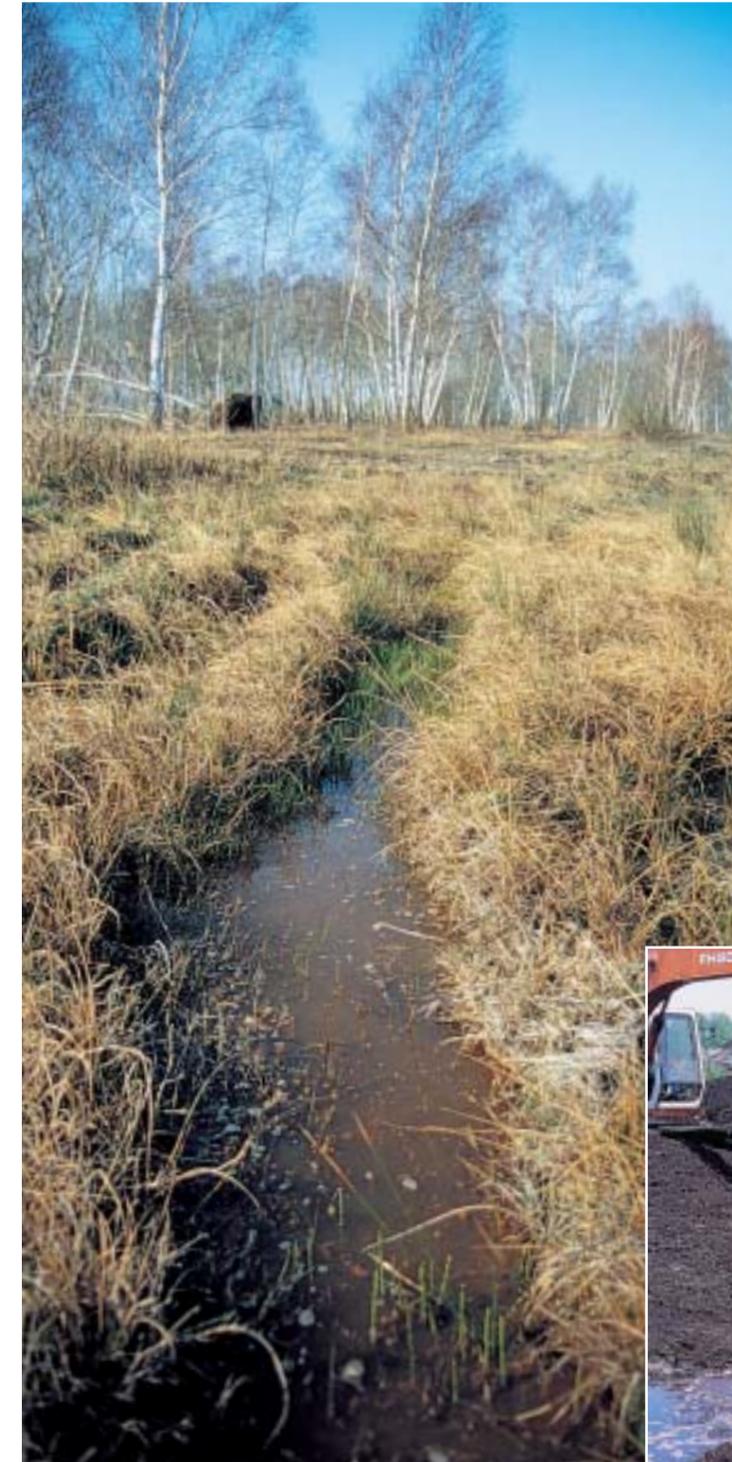
La superficie des mares

Des mares ou plutôt des flaques de quelques mètres carrés peuvent suffire à la reproduction

TABLEAU XXVIII. – Exemples de macro-invertébrés des mares.

Légendes du tableau	NOM SCIENTIFIQUE	NOM FRANÇAIS	CLASSIFICATION	f	m	EUD	HYP	MED	OLI
						Ecologie			
EUD = eaux eutrophes alcalines	ESPÈCES AQUATIQUES								
HYP = eaux hypereutrophes alcalines	<i>Hydra vulgaris</i>	Hydre commune	Cnidaire	x	x	x			
MED = eaux mésotrophes neutres	<i>Cholorohydra viridissimus</i>	Hydre verte	Cnidaire	x	x	x			
OLI = eaux oligotrophes, acides	<i>Spongilla lacustris</i>	Eponge lacustre	Spongiaire	x	x	x			
f : mares s'asséchant l'été	"Turbellariés"	Verts plats - Planaires	Plathelminthes	x	x	x	x	x	
m : mares permanentes	"Rotateurs"	Rotifères	Némathelminthes	x	x	x			
	<i>Planorbis planorbis</i>	Planorbe commun	Gastéropodes	x	x	x			
	<i>Sphaerium corneum</i>	Cyclade cornée	Bivalves	x	x	x			
	"Hirudinés"	Sangsues	Achètes	x	x	x			
	"Hydracariens"	Hydracariens	Acariens	x	x	x			
	"Cladocères"	autres Daphnées	Crustacés	x	x	x			
	"Copépodes"	Cyclops & co	Crustacés	x	x	x			
	<i>Asellus aquaticus</i>	Aselle aquatique	Crustacés	x	x	x			
	"Isopodes"	Isopodes	Crustacés	x	x	x			
	Ephemeroptères	Ephemeroptères	Insectes	x	x	x		x	
	Phryganes	Phryganes	Insectes	x	x	x			
	Gerris sp.	Gerris	Hétéroptères	x	x	x		x	x
	<i>Notonecta</i> sp.	Notonecte	Hétéroptères	x	x	x			
	"Naucoridés"	Naucores	Hétéroptères	x	x	x			
	<i>Nepa cinerea</i>	Nèpe cendrée	Hétéroptères	x	x	x			
	Chironomidés	larves Chironomidés	Diptères	x	x		x		
	<i>Valvata pulchella</i>	Valvée jolie	Gastéropodes	x	x	x			
	<i>Bithynia tentaculata</i>	Bithynie tentaculaire	Gastéropodes	x	x	x			
	<i>Triops cancriformis</i>	Triops	Crustacés	x	x	x			
	<i>Daphnia pulex</i>	Daphnée	Crustacés	x	x		x		
	<i>Hydrometra stagnorum</i>	Hydromètre	Hétéroptères	x	x	x			
	<i>Lymnaea stagnalis</i>	Limnée des eaux stagnantes	Gastéropodes		x	x			
	<i>Physa acuta</i>	Physa aigüe	Gastéropodes		x	x			
	<i>Stagnicola palustris</i>	Limnée des marais	Gastéropodes		x	x			
	<i>Radix auricularia</i>	Limnée auriculaire	Gastéropodes		x	x			
	<i>Radix peregra</i>	Limnée voyageuse	Gastéropodes		x	x			
	<i>Planorbis corneus</i>	Planorbe rouge	Gastéropodes		x	x			
	<i>Nais variabilis</i>	Naiade	Oligochètes		x				
	<i>Tubifex tubifex</i>	Tubifex	Oligochètes		x		x		
	<i>Argyroneta aquatica</i>	Argyronète	Arachnides		x	x			
	<i>Astacus astacus</i>	Ecrevisse à pieds rouges	Crustacés		x			x	
	<i>Gammarus pulex</i>	Gammare	Crustacés		x	x			
	Trichoptères		Insectes		x	x			
	<i>Ranatra linearis</i>	Ranâtre	Hétéroptères		x	x			
	Gyrinidés	Gyrins	Coléoptères		x	x			
	Hydrophilidés	Hydrophiles	Coléoptères		x	x			
	Lépidoptères	larves Papillons	Lépidoptères		x	x			
	ESPÈCES DES BERGES								
	<i>Clubiona phragmitis</i>	Clubione des roseaux	Arachnides	x	x	x			
	<i>Dolomedes</i>	Dolomède	Arachnides		x	x			
	<i>Tetragnatha extensa</i>	Tetragnathe allongée	Arachnides	x	x	x			
	<i>Pirata piraticus</i>	Pirate pirate	Arachnides	x	x	x			
	<i>Pirata piscatorius</i>	Pirate pêcheuse	Arachnides	x	x	x			
	<i>Podura aquatica</i>	Podure	Collemboles	x	x			x	
	Orthoptères	Sauterelles	Orthoptères	x	x				x

Photo 96. Des petites mares, telle cette ornière laissée par un engin de chantier, sont exploitées par les Amphibiens pour la reproduction (Écosphère – M. Pajard).



d'espèces comme le crapaud commun ; mais on pourra avoir l'ambition de créer des mares plus complexes et végétalisées. L'idéal est d'obtenir des conditions diversifiées sur un petit espace. On peut considérer que des superficies de 50 à 1 000 m² sont indispensables pour attirer un nombre intéressant d'Odonates (libellules) ou d'Amphibiens.

Réaliser des « archipels » de mares

La solution la plus intéressante est de constituer un « archipel » de 5 à 10 mares (ou plus) peu éloignées les unes des autres et ayant des caractéristiques différentes : taille, profondeur, substrat, permanentes ou temporaires, plus ou moins végétalisées, etc. Ceci permet d'optimiser la capacité d'accueil pour la faune et la flore.

Les travaux de terrassement

Des pentes très douces (maximum 10:1) sont à prévoir sur au moins une partie des berges. On créera une large gamme de hauteurs particulièrement quand on ne gère pas les niveaux d'eau. On peut également aménager des berges en gradins successifs.

La profondeur de la mare doit être au maximum de 2 m à l'époque des plus hautes eaux. Les berges doivent être douces avec des niveaux variant à l'étiage, entre l'exondation totale (qui stimule la production d'invertébrés et peut être favorable à des espèces végétales de grèves) et une profondeur de 10 à 50 cm. Ceci est favorable à la végétation aquatique et semi-aquatique qui est indispensable dans le cycle de vie des Amphibiens et des Odonates, mais aussi de divers invertébrés qui affectionnent les mares, telles que les différentes punaises d'eau (Nèpes, Notonectes, Gerris, Ranatres...), certaines Araignées de zones humides, différents Gastéropodes aquatiques... D'autre part, les têtards affectionnent particulièrement des eaux peu profondes qui se réchauffent rapidement.

Photo 97. Aménagement d'une mare sur substrat tourbeux. Les mares tourbeuses peuvent abriter une flore particulièrement rare (Écosphère – M. Pajard).

Autant qu'il est possible, les contours doivent être sinueux et formés de petites anses. Ceci est particulièrement important pour multiplier les territoires des mâles de libellules.

Comme dans tous les milieux, on n'utilisera de la terre végétale que si l'on souhaite stimuler la productivité. Dans tous les cas, il faudra le faire avec parcimonie (10 cm d'épaisseur suffisent) surtout si les terres décapées étaient précédemment cultivées.

Afin d'éviter la colonisation du centre de la mare par les végétaux des berges, on peut concevoir la mare en prévoyant un fossé périphérique de 2 m de profondeur sur 1,5 m de largeur. Il est conseillé de consolider les berges du fossé (voir le

chapitre consacré à la tenue des berges) : clayonnage, ouvrages de maçonnerie...

L'alimentation en eau des mares

Les mares sont par définition des petits plans d'eau, dont le volume d'eau est faible comparé à celui d'un étang. Toute dégradation de la qualité des eaux est donc immédiatement ressentie par les « habitants » d'une mare. Veiller à la provenance des eaux d'alimentation d'une mare est donc essentiel. Ceci est d'autant plus vrai que les Amphibiens sont particulièrement sensibles à la pollution.

On peut imaginer différents types d'alimentation en eau des mares.

FIG. 95. – Plan et coupe d'une mare

avec des pentes raides à une extrémité et des pentes très douces à l'autre extrémité.

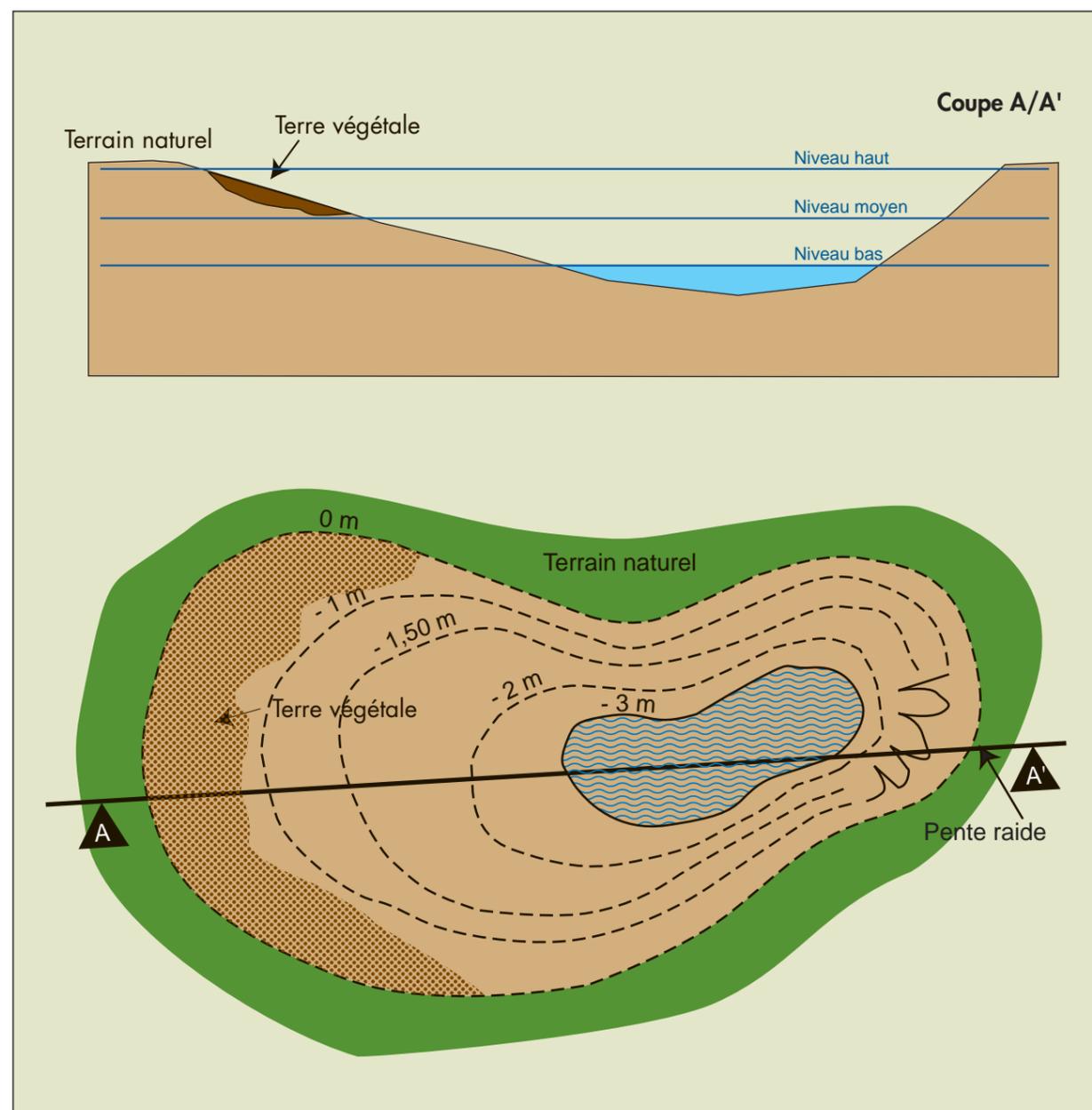


TABLEAU XXIX. – Conditions hydriques défavorables à la création d'une prairie humide.

Source	Particularités
Eaux de pluie	bonne qualité des eaux pH acide (5 à 6) niveaux d'eau très variable avec probables périodes d'assèchement
Fossé	possibilité de gérer le niveau des eaux fossés = liens entre différentes mares ou mares et plans d'eau (connectivité) risque de colonisation par les poissons risque d'un brusque apport d'eaux polluées
Débordement d'un plan d'eau voisin, crues	renouvellement des eaux comblement plus lent de la mare colonisation par les poissons
Nappe phréatique	en général bonne qualité des eaux pH neutre à alcalin niveaux d'eau variables suivant ceux de la nappe

TABLEAU XXX. – Ordre de grandeur des vitesses de filtration des différents matériaux.

Matériaux	Vitesse de filtration (millimètres/heure)
graviers	1 000 mm/h
gravillons	100 mm/h
sables grossiers	10 mm/h
sables	1 mm/h
sables fins	0,1 mm/h
argiles	0,01 mm/h
béton	0,001 mm/h

Les mares alimentées uniquement par les eaux de pluie auront généralement un pH plus acide que celles alimentées par des eaux de ruissellement ou par des débordements d'un plan d'eau. Les mares peu productives (alimentation par des eaux de pluie, substrat très pauvre en matières organiques) ont un intérêt pour certains Amphibiens spécialisés (Crapaud accoucheur, Crapaud calamite...) ou pour des végétaux aquatiques des eaux oligotrophes ou des végétaux de milieux temporairement exondés sur sables, sur argiles...

Les mares aux eaux plus riches (alimentation par des fossés, régalaie de terre végétale, etc.) ont une grande diversité en invertébrés. On y trouve aussi des Amphibiens d'intérêt (tritons, salamandres, rainettes...).

Si c'est possible, il sera intéressant de créer différents types de mares, permanentes et temporaires, alimentées par les eaux de pluie seulement ou par des eaux plus riches...

L'imperméabilisation du fond des mares

Dans le cas de mares permanentes, il faut s'assurer d'un minimum d'étanchéité.

Les fonds de graviers et gravillons sont donc peu indiqués pour des mares (sauf alimentation par la nappe phréatique) : il s'y forme fréquemment des trous par lesquels l'eau fuit (= renards). Les calcaires sont particulièrement peu étanches car ils sont le plus souvent fissurés. En revanche, les fonds sableux, perméables au départ, s'imperméabilisent progressivement en bloquant les particules fines ; on estime qu'ils sont d'une étanchéité acceptable après 2 à 3 ans. Cependant, les matériaux naturels les plus adaptés sont bien sûr les argiles.

Il existe différentes techniques permettant d'améliorer l'étanchéité d'un plan d'eau. La plupart de ces méthodes supposent que l'on puisse travailler le fond à sec.

⇒ le compactage du fond

Le fond est préalablement scarifié si les éléments fins manquent, puis compacté avec des rouleaux (grandes mares) ou le godet de la pelle (petites mares). La technique n'est efficace que si le sol contient au moins 5 % d'éléments fins (sables fins, limons, argiles).

⇒ l'épandage d'argiles

L'épandage d'argiles ou de fines de décantation est recommandée lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'éléments fins (affleurements de sables grossiers, de graviers, de calcaires...). Une couche de 1 m est l'optimum pour assurer une bonne étanchéité.

Les habitats complémentaires des mares

Compte tenu de la biologie des Amphibiens, il faut penser à leurs habitats complémentaires : prairies, boisements clairs (lieux de gagnage et d'hibernation). Si ceux-ci sont éloignés, l'aménagement de corridors de haies, fossés ou hautes herbes permettront aux Amphibiens de les rejoindre en sécurité.

PLANCHE XI. (M. Courcoux). Illustration d'une mare aménagée. On remarquera au premier plan qu'une zone peu végétalisée, argileuse, en pente très douce est ménagée, tandis que les plantes hélophytiques colonisent le reste des berges. Les deux types de berges remplissent des fonctions complémentaires. La valeur de la mare est accrue par le fait qu'elle se trouve au sein d'une prairie.

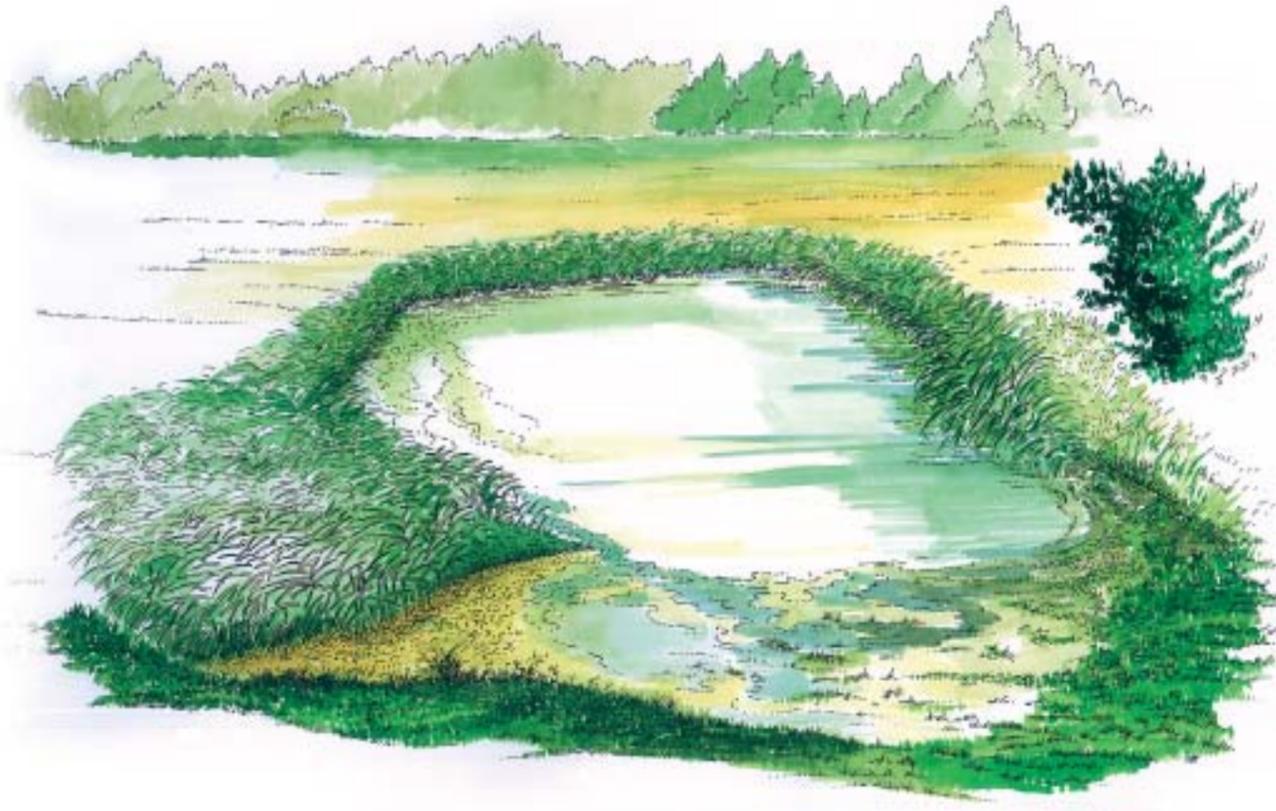


TABLEAU XXXI. – Mélange classique d'espèces* pour végétaliser des berges de mares (eaux mésotrophes à eutrophes).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
Véronique des ruisseaux	<i>Veronica beccabunga</i>	godet racines nues	plantation
Sagittaire	<i>Sagittaria sagittifolia</i>	godet racines nues	plantation
Lysimaque commune	<i>Lysimachia vulgaris</i>	godet racines nues	plantation
Salicaire	<i>Lythrum salicaria</i>	godet racines nues	plantation
Reine des prés	<i>Filipendula ulmaria</i>	godet (semences)	plantation (semis)
Populage des marais	<i>Caltha palustris</i>	godet racines nues	plantation
Menthe aquatique	<i>Mentha aquatica</i>	godet racines nues	plantation
Jonc épars	<i>Juncus effusus</i>	godet racines nues	plantation
Jonc glauque	<i>Juncus inflexus</i>	godet racines nues	plantation
Iris jaune	<i>Iris pseudacorus</i>	godet racines nues	plantation
Plantain d'eau commun	<i>Alisma plantago-aquatica</i>	godet	plantation
Myosotis des marais	<i>Myosotis scorpioides</i>	godet racines nues	plantation

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

5.7.3. LA VÉGÉTALISATION DES MARES

Hormis le cas des mares minérales à Crapaud accoucheur, Crapaud calamite, etc., il est préférable d'avoir des mares végétalisées. Comme il s'agit d'un biotope de taille réduite où l'on cherche à créer des conditions de vie variées, la végétalisation dirigée est recommandée, afin d'éviter la colonisation par une seule espèce envahissante.

Un certain degré de recouvrement par des végétaux aquatiques flottants (enracinés ou non) du type lentilles d'eau, potamots, nénuphars... est souhaitable. Les mares à l'ombre se révèlent nettement moins riches biologiquement. C'est pourquoi, on évitera de planter des arbres à proximité ou de les localiser à l'ombre de boisements. La végétation de berges est indispensable, cependant, son recouvrement ne doit pas être excessif, ne dépassant pas la moitié du pourtour. Ceci permet de profiter des avantages des hélophytes, tout en conservant des zones découvertes plus ensoleillées, qu'elles soient aquatiques ou exondées.

5.7.4. LES INTRODUCTIONS ANIMALES DANS LES MARES CRÉÉES

Il ne faut surtout pas introduire de poissons qui sont prédateurs de têtards et de larves aquatiques d'insectes et qui diminuent très fortement l'intérêt écologique des mares.

La colonisation spontanée des Amphibiens se faisant difficilement dans un rayon de plus d'un ou deux kilomètres, particulièrement s'il y a des obstacles difficiles à franchir (routes, voies ferrées, murs, grande plaine cultivée...) on peut introduire des œufs, des têtards ou dans le cas des Tritons, des adultes. Ceci ne doit pas concerner les espèces rares. Attention cependant, car hormis les grenouilles rousse et verte, tous les Amphibiens sont intégralement protégés en France. Il faudra donc obtenir une autorisation des autorités de l'environnement pour peupler une mare.

Quand créer des îles ?

Pour répondre à la question "quand créer des îles", il faut comparer l'effort fourni aux résultats escomptés.

La création d'îles est justifiée si :

1) la profondeur n'est pas excessive ; dans le cas contraire, on est amené à une telle consommation de remblais que cela est préjudiciable à d'autres aménagements ;

2) une ou quelques espèces rares et/ou de nombreuses espèces communes sont susceptibles de l'utiliser ; (point à vérifier avec des ornithologues)

3) il n'y a pas de problèmes d'érosion ou si la protection contre l'érosion due aux inondations ou au battillage est possible à mettre en place ; dans le cas contraire la probabilité est forte de voir disparaître l'île après quelques années ;

4) on peut assurer un faible niveau de dérangement ; les îles des étangs trop petits ou trop fréquentés ont un faible intérêt ;

5) on peut assurer un entretien ; ceci est surtout vrai des îles minérales dénudées destinées aux Laridés (Sternes et Mouettes).

5.7.5. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES MARES

Si l'on peut contrôler les niveaux d'eau des mares, il est conseillé de maintenir de l'eau entre le mois de mars (arrivée des Amphibiens sur les lieux de ponte) et la fin août (période où tous les têtards ont terminé leur croissance).

Un assèchement automnal tous les 3 à 5 ans détruit les poissons arrivés spontanément. Un curage des mares tous les 20 à 30 ans est a priori suffisant, mais une intervention sur la végétation aquatique est nécessaire en cas de colonisation exagérée ne laissant plus d'espace aquatique libre.

5.8. Les îles et les radeaux

La présence d'un plan d'eau permet de créer des îles. Les exploitants de carrière savent qu'elles sont souvent demandées car elles sont appréciées du public pour leur effet paysager. Il se trouve qu'elles ont aussi un intérêt écologique qui réside principalement dans leur rôle pour certaines espèces d'oiseaux.

La création d'îles ou îlots est une opportunité souvent possible dans les aménagements écologiques de gravières. En effet, l'exploitation des granulats conduit le plus souvent :

⇒ à une profondeur modérée des plans d'eau (bien qu'il y ait des exceptions : carrières de roches massives, bassins alluvionnaires comme celui du Rhin où l'on atteint plusieurs dizaines de mètres) ;

⇒ à la mise à disposition de matériaux de remblai (stériles).

Dans le cas de la présence de zones inexploitable enclavées dans le plan d'eau, la conception des îles est encore plus aisée. Lorsque le matériau de remblai manque ou que la profondeur est excessive, on peut avoir recours à des radeaux, qui sont aménagés comme des îles flottantes artificielles.

5.8.1. LES DIFFÉRENTS TYPES D'ÎLES ET LEUR INTÉRÊT ÉCOLOGIQUE

En fonction de leurs caractéristiques générales, on peut distinguer 4 catégories d'îles.

- 1) les îlots sablo-graveleux peu ou pas végétalisés.
- 2) les îles inondables à grands hélophytes (roseaux, laïches, scirpes...) ou jeunes saules.
- 3) les îles humides (mais non ou peu inondables) à grandes herbes et buissons.

TABLEAU XXXII. – Espèces favorisées par des îlots peu ou pas végétalisés.

Nom français	Nom scientifique	Rareté en France
ESPÈCES TRÈS FAVORISÉES		
Goéland leucophaé	<i>Larus cachinnans</i>	AC
Grand Gravelot	<i>Charadrius hiaticula</i>	TR
Gravelot à collier interrompu	<i>Charadrius alexandrinus</i>	R
Mouette mélanocéphale	<i>Larus melanocephalus</i>	TR
Mouette rieuse	<i>Larus ridibundus</i>	AC
Petit Gravelot	<i>Charadrius dubius</i>	R
Sterne naine*	<i>Sterna albifrons</i>	R
Sterne pierregarin*	<i>Sterna hirundo</i>	R
ESPÈCES ASSEZ FAVORISÉES		
Bergeronnette grise	<i>Motacilla alba</i>	C
Vanneau huppé	<i>Vanellus vanellus</i>	AC

TABLEAU XXXIII. – Espèces d'oiseaux dont la nidification est favorisée par des îles avec formations végétales des berges inondées en quasi-permanence (scirpaies, phragmitaies, cariçaies, typhaies, jeunes saulaies...).

Nom français	Nom scientifique	Rareté en France
ESPÈCES TRÈS FAVORISÉES		
Blongios nain*	<i>Ixobrychus minutus</i>	TR
Canard souchet	<i>Anas clypeata</i>	R
Fuligule milouin	<i>Aythya ferina</i>	R
Grèbe castagneux	<i>Tachybaptus ruficollis</i>	R
Grèbe huppé	<i>Podiceps cristatus</i>	AR
Héron pourpré*	<i>Ardea purpurea</i>	R
Mouette rieuse	<i>Larus ridibundus</i>	AC
Nette rousse	<i>Netta rufina</i>	TR
Sarcelle d'été	<i>Anas querquedula</i>	TR
ESPÈCES ASSEZ FAVORISÉES		
Canard colvert	<i>Anas platyrhynchos</i>	C
Foulque macroule	<i>Fulica atra</i>	C
Gallinule poule d'eau	<i>Gallinula chloropus</i>	C
Marouette ponctuée*	<i>Porzana porzana</i>	R
Râle d'eau	<i>Rallus aquaticus</i>	AC

TABLEAU XXXIV. – Espèces d'oiseaux dont la nidification est favorisée par des îles avec formations herbacées humides (hygrophiles à mésohygrophiles).

Nom français	Nom scientifique	Rareté en France
ESPÈCES TRÈS FAVORISÉES		
Canard chipeau	<i>Anas strepera</i>	R
Canard souchet	<i>Anas clypeata</i>	R
Fuligule morillon	<i>Aythya fuligula</i>	TR
Mouette mélanocéphale	<i>Larus melanocephalus</i>	TR
Mouette rieuse	<i>Larus ridibundus</i>	AC
Nette rousse	<i>Netta rufina</i>	TR
Sarcelle d'été	<i>Anas querquedula</i>	TR
ESPÈCES ASSEZ FAVORISÉES		
Foulque macroule	<i>Fulica atra</i>	C
Gallinule poule d'eau	<i>Gallinula chloropus</i>	C
Marouette ponctuée*	<i>Porzana porzana</i>	R
Râle d'eau	<i>Rallus aquaticus</i>	AC
Vanneau huppé	<i>Vanellus vanellus</i>	AC

* espèces citées à l'annexe I de la Directive Européenne "Oiseaux"

4) les îles boisées d'aulnes, saules, bouleaux, peupliers, frênes...

L'intérêt des îles réside d'abord dans la protection qu'elles offrent vis-à-vis de la prédation terrestre (chiens errants, renards, gros rongeurs...) et des dérangements humains. Cependant, les différents types d'îles ne correspondent pas aux mêmes objectifs.

Les îlots sablo-graveleux.

Ils sont avant tout recherchés pour la nidification des Sternes - qui nichent pratiquement exclusivement sur des îles et dont le biotope naturel est constitué des îlots de sables et graviers du littoral ou du lit des fleuves peu endigués comme la Loire -, des Mouettes, du Petit Gravelot, plus rarement pour le Chevalier guignette ou l'Huîtrier Pie. Les îlots accueillent également les Limicoles en migration. Plus méconnu est leur intérêt floristique pour des espèces végétales pionnières des grèves.

Les îles inondables à grands héliophytes (roseaux, laïches, massettes, scirpes...) ou jeunes saules

A superficie égale, l'intérêt de ces îles est comparable à celui des mêmes formations végétales de berge, mais il s'y ajoute la sécurité propre aux îles, surtout lorsqu'elles sont éloignées de la rive. Les Grèbes huppé et castagneux ou la Foulque macroule, fréquents sur carrière, y nichent volontiers.



Photo 99. Îlot à massettes (CNC - A. Ulmer Ecopole du Forez).



PLANCHE XII. (M. Courcoux).

Selon la hauteur par rapport au niveau moyen des eaux et le type de substrat, on peut distinguer différents types d'îles et îlots. Sur cette illustration on observe : 1) au premier plan à gauche, un îlot peu végétalisé, sablo-graveleux en son centre, plus argileux sur son pourtour et inondable en période de hautes eaux. 2) au premier plan à droite, une île sablo-argileuse, non inondable et colonisée par de hautes herbes. 3) à l'arrière-plan à gauche, un îlot à fleur d'eau, colonisé par de grands héliophytes.

Photo 98. Îlot boisé sur lequel niche une importante colonie de Grands Cormorans (*Phalacrocorax carbo*) (CNC - S. Mahuzier BIOTOPE).

Les îles plus sèches à hautes herbes

De conception simple, ce type d'île est le plus classique et correspond généralement à des enclaves non exploitées parce que le gisement y est médiocre (trop argileux par exemple). Leur superficie dépasse souvent celle des îlots sablo-graveleux. Moyennant certains aménagements et un entretien évitant leur boisement, on peut y maintenir des formations herbacées de divers types. La végétation la plus basse (du type jonçaille) a un intérêt qui se rapproche des grèves peu végétalisées en ce qui concerne les Laridés et favorise certains Rallidés. Les végétations moyennement hautes, du type prairies de fauche, pâturages extensif... ou franchement hautes (mégaphorbiaies) sont essentiellement profitables à la nidification des Anatidés.

Les îles boisées

Comme les précédentes, les îles boisées résultent souvent d'enclaves inexploitées. Le boisement est spontané en l'absence d'entretien et envahit l'île après dix à vingt ans. Les jeunes peuplements de saulaies inondées, ont un intérêt ornithologique qui se rapproche de celui des

TABLEAU XXXV. – Espèces d'oiseaux dont la nidification est favorisée par les îles avec des boisements humides à caractère naturel*.

Nom français	Nom scientifique	Rareté en France
ESPÈCES TRÈS FAVORISÉES PAR LES ÎLES À BOISEMENT DE TYPE NATUREL		
Bihoreau gris**	<i>Nycticorax nycticorax</i>	R
Grand Cormoran**	<i>Phalacrocorax carbo</i>	R
Héron cendré	<i>Ardea cinerea</i>	AC
Héron pourpré**	<i>Ardea purpurea</i>	R
ESPÈCES ASSEZ FAVORISÉES PAR LES ÎLES À BOISEMENT DE TYPE NATUREL		
Milan noir**	<i>Milvus migrans</i>	AR

* c'est-à-dire hétérogènes en classe d'âge et en essences et gérés extensivement, ce qui exclut en particulier les peupleraies de production.

** espèces citées à l'annexe I de la Directive Européenne "Oiseaux".

hautes végétations de berges inondées. En revanche, les îles boisées d'arbres adultes tels que des aulnes, des saules, des bouleaux, des peupliers, des frênes, des chênes pédonculé, etc., sont favorables à deux groupes d'espèces : d'une part les Ardéidés arboricoles, le plus souvent le Héron cendré, d'autre part le Grand Cormoran. Ces espèces les exploitent soit pour la nidification, soit comme dortoir ou reposoir en période d'hivernage et de migration.

Les îles flottantes artificielles (= radeaux)

Les radeaux peuvent être végétalisés ou non et sous ce rapport, l'intérêt pour les oiseaux est analogue à celui des îles naturelles. Cependant, les radeaux sont limités par leur taille et ils ne peuvent supporter des boisements. D'autre part, leur durée de vie est limitée et dépasse rarement 20 ans.

5.8.2. DONNÉES GÉNÉRALES SUR LA CONCEPTION ET L'AMÉNAGEMENT DES ÎLES

Quel que soit le type d'île, un certain nombre de facteurs sont à prendre en compte lors de la conception et des travaux.

La distance aux berges

Les îles jouissent du privilège de constituer des zones de tranquillité vis-à-vis du dérangement et de la prédation. Ce rôle est cependant d'autant plus accentué que les îles sont éloignées des berges. Un bras d'eau de taille assez modeste permet d'empêcher l'accès terrestre et en particulier la fréquentation humaine. Cependant, il est insuffisant pour assurer la sécurité optimale de nombreux oiseaux nicheurs. D'abord, il faut savoir que des prédateurs comme le renard sont capables de nager et de traverser des plans d'eau de plusieurs dizaines de mètres s'ils ont repéré une proie. Ensuite, de nombreux oiseaux, en

particulier ceux qui nichent à découvert, sont farouches et évitent les îles situées trop près du rivage. Autant que cela est techniquement possible, on disposera donc les îles aussi loin que possible des berges du plan d'eau.

Quelle superficie pour les îles ?

On a vu que les îlots sablo-graveleux à Laridés doivent être petits. Indépendamment de ceci, on pourra appliquer la règle générale suivante : plusieurs petites îles valent mieux qu'une seule grande. Ce morcellement a l'avantage de multiplier le linéaire de berge, zone de contact entre la terre, l'air et l'eau, toujours propice à la diversité biologique.

Créer des archipels

En créant plusieurs îles, on aura toujours intérêt à les disposer en archipel. On cumule ainsi les avantages de la multiplication des îles et de l'allongement du linéaire de berge avec les avantages d'une zone de tranquillité regroupée et cohérente. L'archipel présente de nombreux atouts. Par exemple, l'éclatement en petites îles permet de lutter avec efficacité contre l'érosion. L'île exposée au vent protège les autres des vagues créées par la houle. On aura d'ailleurs intérêt à renforcer la berge de celle-ci en l'enrochant. D'autre part, la « lagune » créée au sein de l'archipel pourra être un haut-fond, ce qui sera favorable à la productivité biologique. C'est ainsi que l'archipel ou atoll aura vocation à assurer « le gîte et le couvert » aux oiseaux. L'attractivité supérieure des archipels par rapport aux îles seules est un fait très fréquemment observé sur les plans d'eau naturels ou artificiels.

La forme des îles

Toujours dans le souci d'allonger le linéaire de berge, il est conseillé de réaliser des formes complexes. On pourra, là aussi, mettre à profit les anses créées pour réaliser des hauts-fonds productifs. Des formes telles que le fer à cheval ou la croix de malte sont de bons exemples de formes complexes.

Le modelé des berges

Le modelé des berges dépend de la vocation de l'île. Des berges en pente douce sont souhaitables pour faciliter l'accès terrestre des oiseaux et favoriser la végétation aquatique et hygrophile. Des berges en pente plus inclinée peuvent en revanche diminuer l'accessibilité pour d'éventuels prédateurs. Dans le cas des îles végétalisées destinées principalement aux Anatidés, on peut prévoir des berges assez raides, les canards appréciant de se poster sur le replat formé à leur sommet, qui leur sert de reposoir ; mais il faut pré-

voir au moins une berge en pente douce pour ménager un accès terrestre. Les berges raides ne sont pas un handicap pour les îles boisées. Enfin, des fronts de taille peuvent être laissés en place pour la nidification de l'hirondelle de rivage ou du martin-pêcheur. Leur localisation sur une île à l'avantage d'assurer la tranquillité d'une part, mais aussi de proposer une solution à la question de la sécurité du public que de tels talus peuvent susciter.

Les îles et le marnage du plan d'eau.

Le marnage du plan d'eau est un paramètre important à prendre en considération lors de la conception des îles. En particulier il faut prévoir la hauteur de celles-ci de façon à ce qu'elles ne soient jamais submergées par les hautes eaux. Dans le cas contraire, elles finiront par disparaître définitivement. La connaissance du marnage est aussi nécessaire pour caler les zones de haut-fond et les berges en pente douce. dans le cas d'un archipel, on aura intérêt à prévoir des hauteurs différentes de façon à disposer en permanence de biotopes de reproduction optimaux par rapport aux variations saisonnières et inter-annuelles du niveau de l'eau.



Photo 100. Il est recommandé d'aménager des îlots à différentes hauteurs. On s'affranchit ainsi des incertitudes sur le niveau de la nappe et des variations piézométriques intervenant d'une année sur l'autre (Écosphère. M. Pajard).

La position par rapport aux vents dominants

La position par rapport aux vents dominants est un paramètre important. On a déjà vu qu'il était souhaitable de renforcer les berges exposées. D'autre part, les zones de reposoir doivent être disposées à l'abri.

Végétation et entretien

Comme pour tous les aménagements, la question de la végétation doit être envisagée, qu'on opte pour un laisser-faire ou pour une végétalisation active. Le type de végétation que l'on souhaite obtenir dépend des objectifs : îlots dénudés, îles à roselières, îles à hautes herbes, îles boisées... Si la végétation est laissée à

sa propre dynamique, il faudra agir au niveau des substrats : terre végétale pour doper la colonisation, substrat sablo-graveleux pour limiter la progression des végétaux, etc. Par ailleurs, hormis le cas des îles boisées, un entretien est à prévoir afin de conserver au couvert végétal l'état optimal vis-à-vis de l'objectif.

5.8.3. LES « ÎLOTS À STERNES »

Les îles dénudées ne sont pas destinées aux seules Sternes, mais dans la littérature écologique, elles sont décrites dans le détail essentiellement pour ces espèces. Il faut dire que les îlots alluvionnaires des gravières ont permis aux sternes d'étendre leur aire de répartition. A l'origine d'ailleurs, les îlots n'étaient pas construits à dessein, mais résultaient de l'exploitation des alluvions avec rabattement de la nappe. Depuis une trentaine d'années, la sterne pierregarin a colonisé les vallées de la Seine, de l'Yonne, de la Marne, de l'Oise, de la Meurthe ou du Rhin, cours d'eau presque dépourvus, au contraire de la Loire, d'îlots naturels sablo-graveleux. Cette progression a été telle, que 30 % des sternes pierregarin ne nichent pas sur le littoral se reproduisant sur des gravières. Un processus semblable semble s'amorcer pour la sterne naine et des phénomènes analogues sont observés aux États-Unis dans le haut bassin du Mississippi.

Pour concevoir des îlots à sterne efficaces, il est bon d'avoir à l'esprit la biologie de la nidification naturelle de ces espèces. Dans les rivières, elles choisissent des îlots bas, éloignés des berges. Leur préférence va non pas aux îlots totalement dénudés, mais à ceux qui sont dotés d'un couvert végétal bas et disséminé ou d'objets épars (branches, souches...) : les touffes ou objets servent d'abris. La principale cause d'échec de la reproduction réside dans les crues qui submergent les îlots. Enfin, les sternes ne supportent pas la concurrence des goélands et des mouettes, espèces agressives, qui semblent être plus attirées par des îlots plus grands et un peu plus végétalisés.

Les recommandations faites pour les aménagements visent à recréer artificiellement les conditions idéales de nidification pour les sternes. Elles sont présentées ci-dessous.

⇒ le caractère dénudé de l'île rend les nicheurs très sensibles à la prédation (les renards et autres prédateurs nagent) et de toutes façons les sternes sont farouches : les îles doivent donc être le plus loin possible du rivage ; la distance minimale recommandée est de 150 à 200 m.



Photo 101. Archipel d'îlots sablo-graveleux. Depuis leur réalisation, ces îlots ont permis entre autres la nidification des Sternes pierregarin et naine (*Sterna hirundo*, *S. albigifrons*) et de la Mouette mélanocéphale (*Larus melanocephalus*). (G. Arnal).

⇒ un archipel de plusieurs îlots espacés (au moins 10 m les uns des autres) vaut mieux qu'une seule île ; une centaine de mètres carrés par îlot est suffisant.

⇒ les îlots choisis par les oiseaux nicheurs ne sont pas très élevés au-dessus du niveau de l'eau (optimum autour de 50 cm) ; leurs berges doivent être en pente douce.

⇒ la technique la plus efficace pour ralentir la colonisation végétale consiste à poser une membrane recouverte de 20 à 30 cm de graviers.

⇒ on ne doit en aucun cas faire de plantations sur des îlots à sternes.

⇒ pour des questions de visibilité et donc de sensation de sécurité pour les oiseaux, les

îlots doivent être en zone découverte, sans rideau d'arbre à moins de 200 m.

⇒ les sternes affectionnent les îlots au ras de l'eau, ce qui rend leur nid très sensible au batillage ; il faut donc prévoir des protections du côté des vents dominants (différentes techniques sont proposées : berge au vent plus haute, enrochement, utilisation de rondins d'arbres et de bottes de paille...).

⇒ les sternes ne recherchent pas des îlots totalement dépourvus de végétation, mais apprécient un léger couvert leur permettant d'abriter leur nid ; cet abri procuré par quelques touffes herbeuses peut être remplacé par des pierres ou des morceaux de bois.

Fig. 97. – Coupe d'un îlot à hautes herbes

associé à un haut-fond riche en matières organiques (terre végétale) ; l'association des deux milieux est favorable à la nidification d'Anatidés comme les Canards souchet et chipeau, le Fuligule morillon, la Nette rousse ou la Sarcelle d'été (dessin M. Pajard).

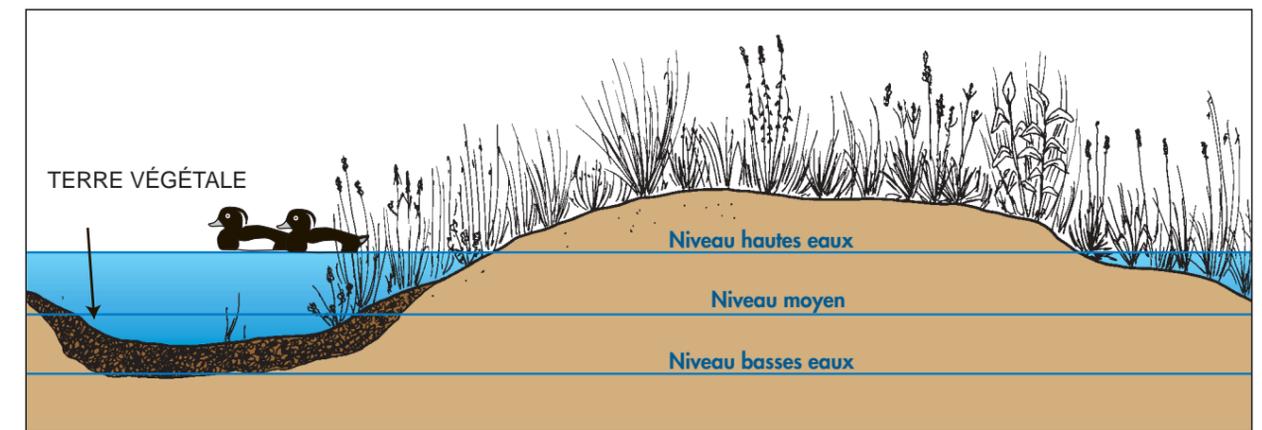
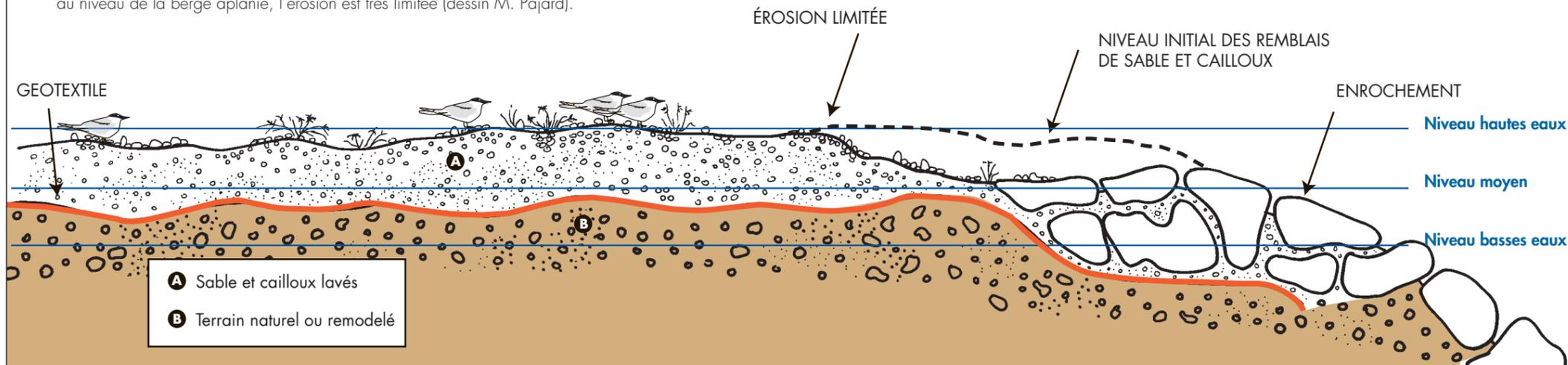


Fig. 96. – Coupe de principe d'un îlot à sternes un an après son aménagement : les sables et cailloux ont stabilisé les enrochements en s'insinuant dans les interstices et au niveau de la berge aplanie, l'érosion est très limitée (dessin M. Pajard).



5.8.4. LES ÎLES VÉGÉTALISÉES

Les prescriptions concernant les autres types d'îles sont moins strictes. D'une manière générale, les îles végétalisées seront plus grandes que les îlots à sternes (1 000 m² à 1 ha). De même la hauteur au-dessus du niveau de l'eau peut être supérieure à condition de prévoir des berges en pente douce (ce point n'est pas nécessaire pour les îles boisées à Hérons arboricoles et Grand Cormoran).

Quoique moins cruciale, la distance à la rive est toutefois à prendre en considération toujours pour des questions de dérangement et de prédation. Importante aussi, la protection contre l'érosion pour les berges au vent.

Des zones de hauts-fonds productives de différentes profondeurs, des secteurs à végétation plus basse ainsi que des « plages » abritées permettent à différentes espèces d'Anatidés de trouver sur place l'essentiel de leurs besoins.

5.8.5. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES ÎLES ET ÎLOTS

L'entretien dépend du type d'île. Les travaux à effectuer sont les suivants :

⇒ pour les îles dénudées, une intervention annuelle (d'octobre à février) est indispensable ;

⇒ pour les îles à hélophytes il faut éliminer les ligneux indésirables tous les ans et faucher après quelques années ;

⇒ pour les îles boisées, il n'y a pas d'entretien et il faut laisser les arbres morts et les charlis.

5.8.6. LE CAS PARTICULIER DES RADEAUX

Le côté franchement artificiel des radeaux peut rebuter. Ils sont pourtant visiblement assez fréquents en Grande-Bretagne et en Allemagne.

Des cas existent aussi en France où des radeaux à Sternes pierregarin ont été installés avec succès, par exemple sur les bassins de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine dans l'Aube, sur les anciennes gravières de Cannes Ecluses (77), dans la réserve naturelle volontaire de Sermaize à Bois-le-Roi, sur le réservoir du Der-Chantecoq...

L'avantage des radeaux est double :

- 1) on peut les installer en zone profonde, sans avoir à consommer de matériaux de remblai ;
- 2) ils ne sont pas sensibles au marnage puisqu'ils flottent.

Leur gros inconvénient est d'ordre esthétique, encore que des radeaux végétalisés puissent être méconnaissables. Par ailleurs, leur longévité ne dépasse guère 20 ans, ce qui nécessite leur remplacement périodique.

Ils peuvent être réalisés en bois, en métal, en plastique et même avec des bottes de paille fixées



Photo 102. Exemples de radeaux en cours d'aménagement (Écosphère - M. Thauront).

à des tuteurs. Les radeaux sont toujours arrimés. Ils peuvent être imperméables ou en communication avec les eaux de l'étang. On peut planter des joncs, massettes, roseaux, iris d'eau, baldingère, menthe aquatique, lysimaque commune, etc. et des ligneux comme les saules s'y installent facilement.

L'entretien dépend de l'objectif et il est semblable à celui des îles véritables.

5.9. Les fronts de taille et microfalaises

L'Hirondelle de rivage (*Riparia riparia*) est une des premières espèces dont on a remarqué la nidification sur les carrières et bien des exploitants de gravières ont eu l'occasion de l'observer. En effet l'espèce, qui est pionnière, profite des talus raides dans les alluvions (ou plus rarement des tas de matériaux) que crée l'exploitation pour creuser les galeries et loges dans lesquelles elle niche, y compris pendant les travaux d'extraction. Cet intérêt déjà ancien porté aux Hirondelles de rivage et à leur nidification notoire sur les gravières a conduit tout naturellement à considérer d'autres espèces qui nichent dans le même type de milieu.

5.9.1. LE RÔLE DES FRONTS DE TAILLE ET MICROFALAISES DANS LA BIODIVERSITÉ

Le Martin-pêcheur d'Europe (*Alcedo atthis*), espèce nicheuse assez rare en France et « à surveiller » dans l'Union Européenne (citée à la Directive Oiseaux) est plus exigeant que l'Hirondelle de rivage. Elle est aussi plus menacée en raison de la rectification des cours d'eau. Là

encore, l'intérêt des gravières est à considérer de près. Le Guêpier d'Europe (*Merops apiaster*), elle aussi espèce nicheuse assez rare en France et « à surveiller » dans l'Union Européenne niche dans des carrières surtout sèches mais aussi dans des gravières. La Huppe fasciée (*Upupa epops*), assez commune en France, mais en régression, apparaît également nicheuse sur des sites de gravières. Notons enfin le Moineau soulcie (*Petronia petronia*), assez rare en France et nicheur sur un site près de Toulouse.

Plus récemment, on a commencé à considérer l'intérêt des talus meubles en sables et limons pour des Insectes peu communs, appartenant à différents groupes :

- Hyménoptères : abeilles, pompiles ou fausses guêpes, guêpes maçonnes, guêpes fouisseuses. Chaque année plusieurs nouvelles espèces sont trouvées dans les carrières en Allemagne.



Photo 103. Aménagement d'un talus à Hirondelles de rivage (*Riparia riparia*). Les alignements d'orifices correspondent à l'entrée des loges creusées par les oiseaux. On remarquera que le site est sécurisé par une clôture. (Écosphère - V. Leloup).

Photo 104. Guêpiers d'Europe (*Merops apiaster*) nichant dans un talus de matériaux stériles sommairement consolidés (CNC - M. Cambrony).

La gravière de Favorney (70), par exemple, abrite dans ses talus d'alluvions, 4 espèces d'Hyménoptères fouisseurs, rares en France.

- Coléoptères de la famille des Staphylinidés (dans les nids d'Hirondelles de rivage) ou de la famille des Tenebrionidés (aussi dans les falaises de graviers).

5.9.2. L'AMÉNAGEMENT DES MICROFALAISES SUR CARRIÈRE

Jusqu' alors, trois types de microfalaises ont été créés dans le cadre d'aménagements écologiques de gravières :

- 1) microfalaises pour les Hirondelles de rivage ;
- 2) microfalaises pour le Martin-pêcheur ;
- 3) microfalaises pour les Insectes (aménagements rares à ce jour).

Les microfalaises pour les Hirondelles de rivage

Les talus à Hirondelles de rivage sont faciles à créer et se révèlent le plus souvent efficaces (du moins les premières années, c'est-à-dire avant que n'intervienne une colonisation végétale et d'éventuels effondrements). Les recommandations sont les suivantes :

- compte tenu de la nature coloniale de l'espèce, il faut prévoir des falaises larges ;
- pour la hauteur un minimum de 3 à 4 m est préconisé et les microfalaises ne doivent pas être inondables : les Hirondelles de rivage ont tendance à éviter de nicher trop près de l'eau ;
- le matériau doit être en même temps meuble (afin que les oiseaux puissent creuser

leurs loges) et solide (afin que le mur ne s'effondre pas et ne bloque les galeries) ;

- pour des raisons de tranquillité, le haut du mur ne doit pas être accessible et une zone tampon de 1 à quelques m est souhaitable.

Sur différents sites en Europe des murs artificiels ont été aménagés. Il s'agit d'équipements où des éléments cylindriques creux (en matériaux de construction ou en plastique) sont introduits dans un mur d'alluvions. L'ensemble est consolidé à la base avec des moellons ou un mur en béton. Ce type de réalisation est effectivement utilisé par les Hirondelles de rivage, oiseaux très opportunistes.

Les microfalaises pour le Martin-pêcheur

Le Martin-pêcheur d'Europe est un oiseau nicheur devenu assez rare en France. Partout l'espèce souffre des recalibrages et endiguements de cours d'eau, des reprofilage et des rectifications de berges, etc. Le Martin-pêcheur est une espèce exigeante. Territoriale, elle niche dans son biotope initial, les cours d'eau non aménagés, à une densité moyenne de 1 à 3 couples par km.

Naturellement présent dans les gravières, avec une fréquence assez remarquable, le Martin-pêcheur est plus difficile à maintenir ou à attirer artificiellement. L'espèce a en effet des exigences qui ne sont pas toujours faciles à satisfaire, sauf en ce qui concerne les caractéristiques physiques du talus : elle se contente en effet d'une largeur de 1 m et d'une hauteur de 0,5 m, mais il vaut mieux prévoir un peu plus (1 à 3 m), et là encore veiller à maintenir les sites hors d'eau. Les matériaux peuvent être divers (sables, limons, argiles, marnes) à condi-

tion qu'ils soient suffisamment meubles pour que l'oiseau creuse sa loge de 40 à 80 cm de profondeur, mais assez solides.

Les autres comportements du Martin-pêcheur rendant le succès des aménagements plus difficile sont les suivants :

- 1) l'espèce est très sensible au dérangement et refuse les sites accessibles ;
- 2) mais inversement, l'oiseau ne retiendra pas des microfalaises trop camouflées qu'il ne peut surveiller à distance ;
- 3) outre son biotope de nidification, elle a besoin d'une rive boisée bien stratifiée et apprécie les arbres morts ;
- 4) en ce qui concerne sa zone de chasse, il lui faut des eaux assez productives en poissons, mais claires à modérément turbides.

Contrairement à ceux mis en place pour les Hirondelles de rivage, les talus créés au bord de plans d'eau artificiels pour le Martin-pêcheur semblent peu utilisés. L'écologie de cette espèce étant assez complexe, il vaudra donc mieux préserver et entretenir les fronts de taille où l'espèce s'installe spontanément qu'essayer de l'attirer par des aménagements réalisés à son intention.

Les microfalaises pour les Insectes

Ce type de réalisation est encore peu fréquent. On peut donner les conseils suivants :

- une faible hauteur, même inférieure à 0,5 m est suffisante ;
- une exposition méridionale est souhaitable ;
- le talus doit être à proximité d'une zone riche en plantes à fleurs.

5.9.3. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES MICROFALAISES

La nécessité d'un entretien est un point commun à tous les types de fronts de taille. On constate en effet systématiquement que ces talus, même lorsqu'ils ont été aménagés de manière ad hoc et qu'ils sont d'abord largement utilisés par les espèces spécialisées sont petit à petit désaffectés puis complètement abandonnés. Diverses raisons expliquent le phénomène :

- 1) les sites sont colonisés par des mousses et lichens, puis par des plantes de friches, enfin par des buissons. La colonisation procède généralement depuis le haut, avec des tiges et des branchages qui retombent devant les talus ;

2) sous l'effet de l'érosion, des ruissellements, etc., on constate des affaissements et des effondrements ;

3) après quelques années, les loges peuvent également être colonisées par des parasites des oiseaux, ce qui entraîne finalement l'abandon des colonies.

Si l'on souhaite donc maintenir ces milieux pionniers, il faut impérativement les entretenir régulièrement, comme le font naturellement les eaux de la rivière. Cet entretien consiste d'une part à empêcher la végétation de les envahir, d'autre part à dégager les matériaux d'effondrement. Une bonne méthode consiste à rafraîchir les front de taille à la pelle.

5.10. Les pelouses et les landes sablo-caillouteuses de type « steppique »

Les espaces sableux ou sablo-caillouteux dégagés sont l'un des milieux assez faciles à créer sur carrières et qui apparaissent même souvent du fait de l'exploitation. Cependant, considérés comme une conséquence du chantier d'extraction, comme une sorte de « cicatrice dans le paysage », ils ont tendance à être rapidement aménagés, avec régalage de terre végétale, ensemencements et plantations (par exemple de conifères). Ces habitats constituent pourtant des biotopes en voie de régression qui constituent l'habitat de prédilection de différentes espèces végétales ou animales. Dénués de productivité immédiate, de tels milieux peuvent être difficiles à faire admettre. Ils ont cependant souvent, outre leur intérêt écologique, une valeur paysagère (diversification des milieux et espace de respiration au sein de territoires très exploités). Ce sont enfin des espaces qui consomment peu de terre végétale, ce qui est un atout pour les sites où celle-ci est rare.

5.10.1. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR L'AMÉNAGEMENT DES PELOUSES ET LANDES

La définition de ces habitats met en jeu trois paramètres principaux :

- 1) la superficie : ce type de milieu n'atteint sa pleine valeur qu'à partir de quelques hectares et ce pour diverses raisons : sensation de sécurité pour les espèces nicheuses, freinage de la colonisation par les arbres et arbustes, milieu peu productif où la densité en individus de la plupart des espèces est faible (plus l'espace est



Photo 105. Pelouse oligotrophe caillouteuse calcaire aménagée sur un site de gravière (Écosphère – M. Pajard).



Photo 106. Pelouse rase dans une exploitation de sables et galets littoraux. Le Traquet moiteux (*Oenanthe oenanthe*) est nicheur dans cette formation (CNC - Hermine).

grand, plus on aura de chances de voir se maintenir un grand nombre d'espèces)...

2) le type de substrat : il peut s'agir de sables et cailloux calcaires, siliceux ou silico-calcaires. En outre, on peut aller de sables secs à des sables argileux temporairement humides. Enfin la proportion entre sables et cailloux est variable.

3) les types de végétation caractéristiques de ces substrats (hormis les boisements) se répartissent entre un pôle pratiquement dénué de végétation (cailloux, sables très oligotrophes) à une lande ouverte à bruyères, ajoncs ou genêts, en passant par des pelouses plus ou moins dénudées ; le caractère plus ou moins clairsemé du milieu est une donnée écologique essentielle.

5.10.2. LE RÔLE DES PELOUSES ET LANDES DANS LA BIODIVERSITÉ

La végétation basse de ces milieux peut être remarquable sur carrière avec en particulier des espèces des pelouses siliceuses, des pelouses sablo-calcaires, des sols sableux secs ou temporairement humides, des landes acides à bruyères... Citons par exemple la Jasione des montagnes (*Jasione montana*), la Cotonnière blanchâtre (*Filago arvensis*), la Cotonnière naine (*Logfia minima*), l'Hélianthème taché (*Xolantha guttata*), le Scléranthe annuel (*Scleranthus annuus*), la Spergulaire rouge (*Spergularia rubra*)...

En ce qui concerne les oiseaux recensés sur gravière, plusieurs espèces remarquables sont susceptibles de nicher dans des pelouses et landes ouvertes sur sables :

► **L'ÉPIERRAGE** est une pratique agricole classique dans la préparation des sols. Ceci se justifie lorsqu'on cherche à cultiver ou végétaliser rapidement. C'est pourquoi elle est fréquemment proposée. Dans le cas des aménagements écologiques, elle ne doit pas être pratiquée lorsqu'on vise un milieu ouvert car beaucoup d'espèces des milieux "steppiques" (oiseaux nicheurs, reptiles...) apprécient la présence de cailloux.

- dans des milieux ouverts de type « steppique » : l'Alouette calandrelle (*Calandrella brachydactyla*), le Cochevis huppé (*Galerida cristata*), l'Oedicnème criard (*Burhinus oedicnemus*), le Traquet motteux (*Oenanthe oenanthe*), l'Alouette lulu (*Lullula arborea*), le Pipit rousseline (*Anthus campestris*)...
- dans des milieux plus fermés du type lande : l'Engoulevent d'Europe (*Caprimulgus europaeus*).

De nombreuses autres espèces fréquentent également ces milieux lorsqu'ils sont ponctués d'arbres ou d'arbustes ou lorsque existent des haies, fronts de taille... Citons la Chouette chevêche (*Athene noctua*), la Huppe fasciée (*Upupa epops*), le Guêpier (*Merops apiaster*), les Pies-Grièches (*Lanius spp.*)...

Les sols pauvres avec une végétation basse constituent aussi un biotope favorable à certains Reptiles à condition qu'ils y trouvent des zones chaudes.

TABLEAU XXXVI. – Mélange d'espèces* classiques pour végétaliser une pelouse sableuse (sol sec et acide).

Nom français	Nom scientifique	Forme(s) commerciale(s)	Technique(s) d'implantation
ESPÈCES DOMINANTES (jonc et graminées)			
Agrostis commun	<i>Agrostis tenuis</i>	semences	semis
Flouve odorante	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	semences	semis
Épervière piloselle	<i>Hieracium pilosella</i>	semences	semis
Orpin âcre	<i>Sedum acre</i>	godets	plantation
		godets (semences)	(semis)
Corynéphore blanchâtre	<i>Corynephorus canescens</i>	semences	semis

* les espèces sélectionnées sont adaptées au milieu et ont une disponibilité commerciale satisfaisante ; on choisira des écotypes locaux et on évitera les espèces régionalement rares.

Photo 107. Pelouse à Hélianthème tâché et jeune lande à callune sur sables et cailloux siliceux. Ces formations ont été déplacées et remises en place dans le cadre d'un aménagement écologique de gravière (Écosphère – M. Pajard).



5.10.3. L'AMÉNAGEMENT DES PELOUSES ET LANDES SUR CARRIÈRES

Les principales conditions pour créer un milieu sablo-caillouteux de type steppique sont celles-ci :

- disposer en quantité suffisante d'un matériau de remblai adéquat, à savoir sableux ou sablo-caillouteux (ce qui peut être le cas de la découverte sur les terrasses décalcifiées moyennes ou hautes des grandes vallées) ;
- disposer d'un espace assez grand d'un seul tenant ;
- pouvoir entretenir la végétation afin d'éviter le boisement et gérer la fréquentation de ce type de milieu qui attire facilement des activités comme la moto tout-terrain, le camping sauvage...

Il arrive que sur un même site on dispose de sables très siliceux pour une partie de la découverte, alors qu'ils sont silico-calcaires (en général parce qu'ils contiennent des fossiles) pour une autre partie. Lorsque la distinction est nette, il sera utile de décaper et de stocker les deux types de sables séparément. En effet, la végétation sur sables très siliceux diffère de celle sur sables silico-calcaires. Une distinction identique pourra être faite entre des sables argileux et des sables purs.

Il n'y a guère de spécification en ce qui concerne les travaux de terrassement et l'on peut créer toute une gamme de substrat : sable seul, cailloux seuls, mélange sablo-caillouteux, diversification des textures de sable... C'est-à-dire que l'on cherchera à valoriser chaque substrat en évitant de les mélanger.

La terre végétale n'est pas indispensable dans ce genre d'habitat. Si l'on doit en utiliser, on veillera à ce qu'elle ne soit pas nitrée (prendre de la terre végétale n'ayant pas été cultivée) et on

n'en réglera pas plus de 5 cm, en la mélangeant de surcroît avec le sable en pratiquant un travail superficiel. La « terre végétale » à utiliser sur les substrats acides est du type « terre à bruyère », très riche en matières végétales plus ou moins bien décomposées.

5.10.4. LA VÉGÉTALISATION DES PELOUSES ET LANDES

Dans ce type d'habitat, on peut s'abstenir de végétaliser en laissant la dynamique naturelle se développer. Il s'agit généralement sur des substrats très pauvres d'un processus lent.

Sur des sols un peu plus riches, on peut souhaiter mettre en place un couvert végétal, par exemple pour limiter la possibilité d'installation d'espèces ligneuses (ronces, conifères...) ou pour des questions esthétiques.

La transplantation de landes à bruyères peut être envisagée sur ce type de substrat lorsqu'il est acide. Il peut s'agir de landes à callune (*Calluna vulgaris*), de landes à bruyères (*Erica spp.*)...

Photo 108.

L'Hélianthème tâché (*Xolantha guttata* = *Tuberaria guttata*), une espèce annuelle peu fréquente, caractéristique des pelouses sableuses ou sablo-caillouteuses siliceuses, éventuellement partiellement humides mais toujours sèches en été (Écosphère - V. Leloup).



5.10.5. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES PELOUSES ET LANDES

Les milieux de type « steppique » ouverts, même s'ils sont pauvres et que le phénomène est lent, évoluent inéluctablement vers une emprise croissante de la végétation herbacée haute (espèces des fiches, fougères aigle, etc.), voire directement ligneuse : bruyères, ronciers, arbustes, arbres, qui s'établissent par noyaux ou progressent depuis les lisières. La présence de lapins peut ralentir cette évolution. Si l'on veut la bloquer, on pourra envisager :

- de faucher ou broyer régulièrement (selon la richesse du substrat, la périodicité pourra aller de 1 fois par an à une fois tous les 2 à 3 ans).
- d'entretenir par un pâturage ovin extensif.

5.11. Les haies et bandes boisées

Les « haies champêtres », terme faisant référence aux haies bocagères souvent très anciennes et constituant un véritable habitat avec toute sa complexité, ont eu beaucoup à souffrir des remembrements. C'est pourquoi, il est toujours intéressant d'en prévoir dans le cadre d'aménagements écologiques. Mais dans le cadre d'un aménagement de carrière, le rôle de limites de propriété qui était celui des haies, n'a plus toujours lieu d'être. On pourra donc étoffer quelque peu les haies pour en faire des bandes boisées.

5.11.1. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE POUR LA CONSTITUTION DES HAIES ET BANDES BOISÉES

Ce qui est recherché dans la création d'une haie ou d'une bande boisée est plus un rôle fonctionnel dans l'écosystème qu'une biodiversité en soi. Parmi les fonctions remplies par les haies, citons :

- 1) le rôle de corridor et de connexion entre différents milieux ; la haie est en effet un axe privilégié de déplacement des organismes (insectes, amphibiens, mammifères) et le maillage des haies doit être conçu selon ce principe ;
- 2) le rôle d'habitat complémentaire pour de nombreuses espèces de zones humides ;
- 3) le rôle d'écrans, brise-vent, anti-bruit⁽³⁷⁾, anti-poussières, visuels (pour des espèces farouches) ;

⁽³⁷⁾ L'efficacité anti-bruit des haies est surtout psychologique car une source de bruit qui ne se voit pas est moins souvent jugée gênante.

4) rôle alimentaire à la mauvaise saison, en particulier en raison de la persistance de fruits et de graines ;

5) rôle de délimitation du site, d'organisation des cheminements ou de « verrous » par rapport à des zones à préserver de la fréquentation.

5.11.2. LE RÔLE DES HAIES ET BANDES BOISÉES DANS LA BIODIVERSITÉ

En ce qui concerne les haies comme habitats, elles sont souvent riches en nombre d'espèces, mais ces espèces sont communes pour la plupart. Par exemple dans le cas des oiseaux, une cinquantaine d'espèces peuvent nicher dans des haies à proximité de gravières, mais seules quelques-unes présentent un certain intérêt patrimonial :

- les pies-grièches, prédateurs de gros insectes, dont les haies surtout épineuses constituent le biotope de prédilection. Citons en particulier, la Pie-grièche écorcheur (*Lanius collurio*) présente sur des gravières (l'espèce est à l'Annexe I de la Directive Européenne « Oiseaux »).

- deux espèces peu communes en France, dont la nidification sur carrières a été observée : le Hibou moyen-duc (*Asio otus*) et la Fauvette babillarde (*Sylvia curruca*).

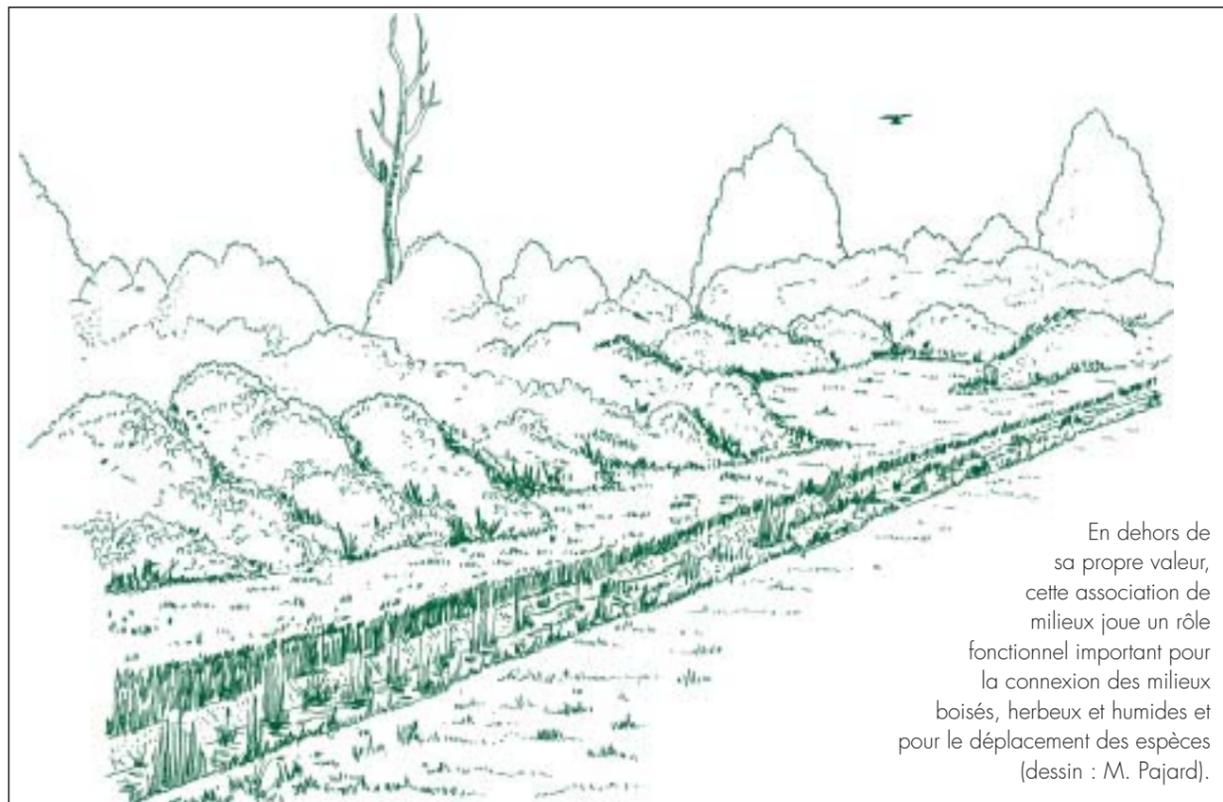
5.11.3. LA CONCEPTION DES HAIES ET BANDES BOISÉES SUR CARRIÈRES

Principes généraux

Autant que possible, il est recommandé de suivre les principes suivants :

- 1) les organismes des biocénoses animales des haies sont parfois des colonisateurs assez lents ; c'est pourquoi, si des haies existent sur le site, et que l'exploitation le permet, il faudra les conserver et réaliser les nouvelles plantations en les connectant aux anciennes ;
- 2) il est préférable d'utiliser des espèces végétales locales qui d'une manière générale accueillent beaucoup plus d'insectes (principale ressource alimentaire pour de nombreux oiseaux) que les espèces horticoles ;
- 3) il faut diversifier la composition en espèces ligneuses afin d'offrir le maximum d'opportunités concernant les habitats ou la ressource alimentaire ;
- 4) la structure tridimensionnelle de la haie est importante ; on peut prévoir plusieurs strates (arbustes de différentes tailles) et les « meilleures haies » sont celles qui hébergent quelques arbres de haut jet ;
- 5) l'intérêt écologique des haies et bandes boisées est renforcé par l'association avec deux autres biotopes linéaires : des layons herbeux

FIG. 98. – Exemple de conception d'une bande boisée. On remarquera la plantation de quelques arbres de haut jet, l'aménagement d'un fossé et d'une bande herbeuse (= layon) qui forme une lisière sinueuse avec la haie et enfin un entretien peu intensif (une taille tous les 3 à 5 ans, le maintien des arbres morts...).



En dehors de sa propre valeur, cette association de milieux joue un rôle fonctionnel important pour la connexion des milieux boisés, herbeux et humides et pour le déplacement des espèces (dessin : M. Pajard).

d'une quinzaine de mètres de largeur et des fossés ; dans ce cas les rôles de catalyseur biologique et de corridor joués par les écotones sont fortement augmentés.

6) compte tenu du temps de croissance par nature plus long des ligneux, il faut envisager de planter au plus tôt, si possible avant même la fin de l'exploitation.

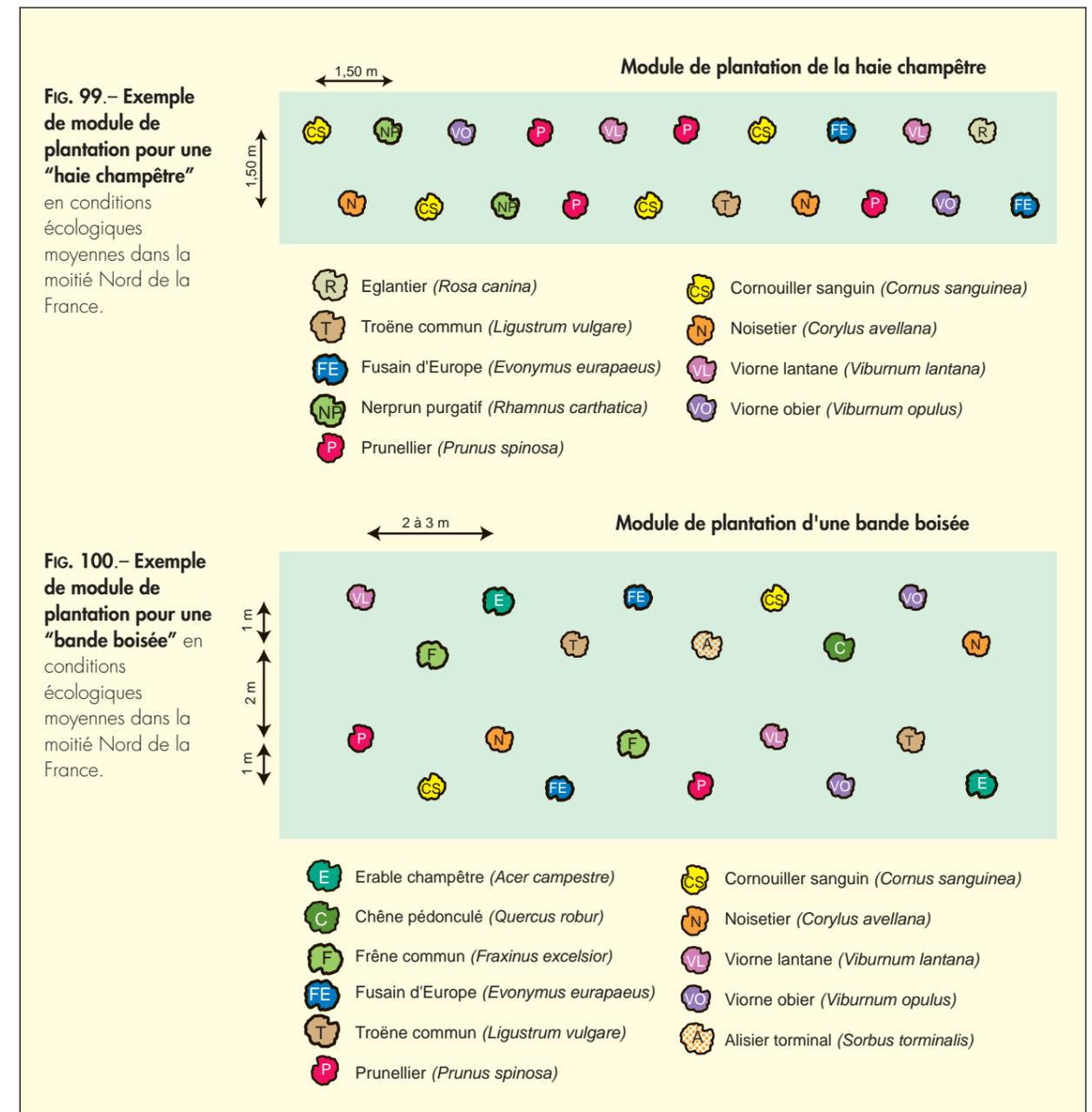
7) dans la localisation des haies, surtout si elles comprennent des arbres de haut jet, on doit veiller à ne pas fermer certains espaces conçus pour être dégagés : par exemple, les grands plans d'eau destinés à l'hivernage des

canards ne doivent pas être fermés de toutes parts.

Plantations

Il faut d'abord choisir des essences adaptées à la région et aux conditions du site. On trouvera au chapitre suivant « Les boisements » des propositions de composition de plantation. S'il s'agit de haies, on ne tiendra compte que des espèces arbustives.

Il est ensuite utile de réaliser des modules de plantation tels que ceux présentés ci-dessous. Le module constitue une unité de plantation que l'on peut ensuite répéter autant de fois que nécessaire.



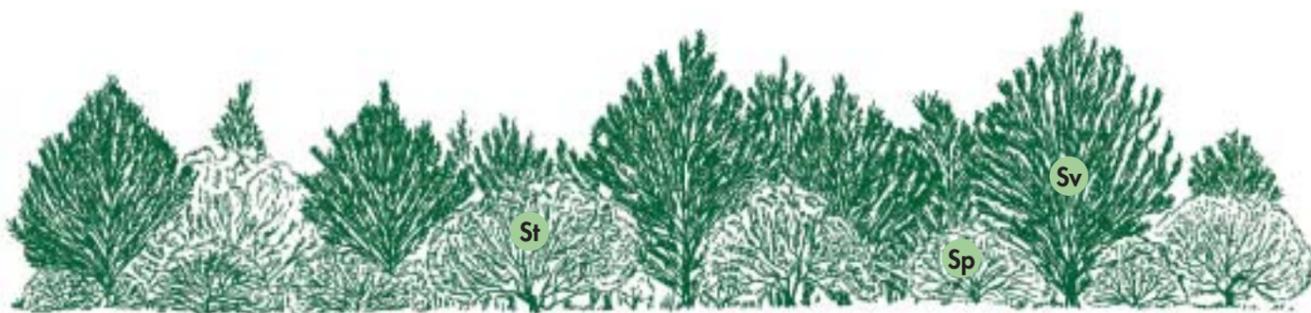


FIG. 101. – Aspect d'une haie de saules sur sol alluvial grossier supportant de forts battements saisonniers de la nappe (dessin : M. Pajard).

Sp = Saule pourpre (*Salix purpurea*)
Sv = Saule osier (*Salix viminalis*)
St = Saule à trois étamines (*Salix triandra*)

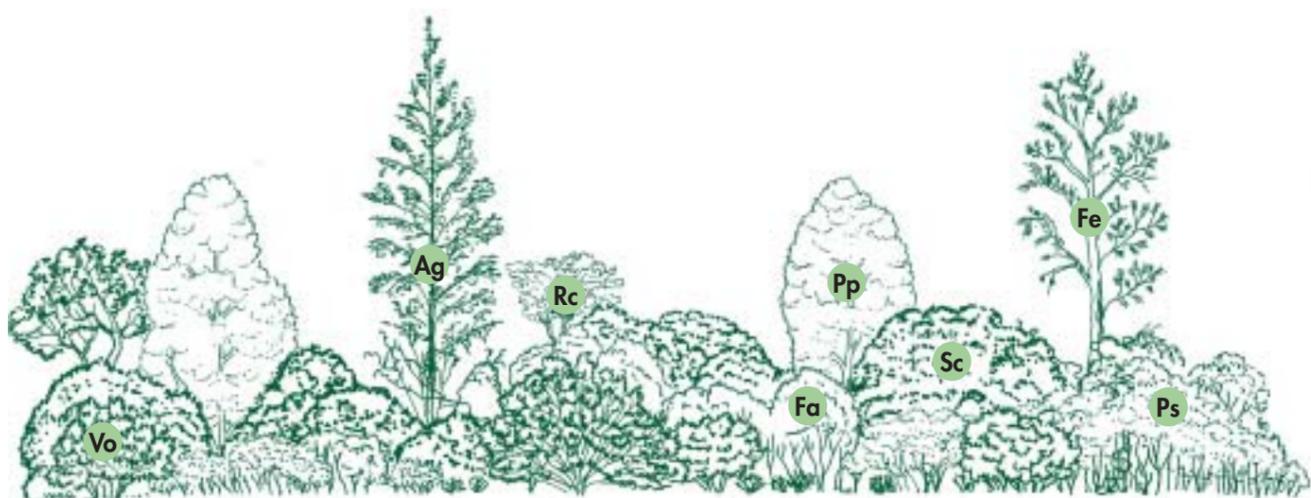


FIG. 102. – Aspect d'une bande boisée sur sol alluvial argilo-limoneux humide et riche en matière organique (dessin : M. Pajard).

Ag = Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*)
Fe = Frêne commun (*Fraxinus excelsior*)
Pp = Cerisier à grappes (*Prunus padus*)
Vo = Viorne obier (*Viburnum opulus*)
Rc = Nerprun purgatif (*Rhamnus cathartica*)
Fa = Bourdaine (*Frangula alnus*)
Sc = Saule cendré (*Salix cinerea*)
Ps = Prunellier (*Prunus spinosa*)

5.11.5. LES HAIES BRISE-VENT

Pour protéger différents milieux et en particulier les plans d'eau contre les vents dominants, les haies brise-vent sont beaucoup plus efficaces que des écrans totalement étanches (murs, mureaux...). D'ailleurs la meilleure haie brise-vent est semi-perméable, c'est à dire qu'elle présente une densité de l'ordre de 50 à 60 %. Le bénéfice d'une telle haie se fait ressentir jusqu'à environ 25 fois sa hauteur (10 m à 250 m).

Cependant, pour éviter d'ombrager trop un plan d'eau et empêcher que les feuilles mortes ne s'y déposent, il est conseillé de disposer les haies brise-vent à quelque distance des berges.

TABLEAU XXXVII. – Influences de la profondeur et de l'allongement du plan d'eau sur la hauteur et la longueur des vagues pour un vent de 60 km/h. D'après ANDREWS J. & KINSMAN D (1990).

Profondeur	1,5 m		7,5 m	
Longueur dans le sens du vent	150 m	600 m	150 m	600 m
Hauteur des vagues	0,20 m	0,33 m	0,20 m	0,39 m
Longueur des vagues	2,8 m	4,7 m	2,8 m	5,5 m

5.11.5. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES HAIES

Un sur-entretien des haies est tout à fait inutile et coûte cher. Une taille annuelle n'est nullement indispensable, mais un élagage de temps en temps (tous les 3 à 5 ans) stimule la croissance et permet une densification des strates basses.

On évitera de réaliser les coupes pendant les périodes de nidification ; la meilleure saison est l'hiver.

Tailler les saules en "têtards",

La taille en "têtards" consiste à écimier les arbres et à les tailler de façon à favoriser le développement des repousses supérieures. Ce type d'entretien est généralement pratiqué sur les saules blancs (*Salix alba*) sur lesquels il favorise la création de cavités.

Les avantages d'un tel traitement sont :

- 1) le contrôle de la croissance des saules, qui est rapide ;
- 2) la création de cavités, habitats pour les invertébrés, les chauves-souris et les oiseaux, en particulier la Chouette chevêche ;
- 3) un rôle paysager avec le rappel esthétique et culturel des bocages humides traditionnels.



(dessin M. Pajard)

5.12. Les boisements

5.12.1. LES DONNÉES ÉCOLOGIQUES ET FONCTIONNELLES À PRENDRE EN COMPTE

Contrairement à la plupart des milieux décrits dans ce guide, les boisements ne sont pas en régression sur le territoire français. Ils sont même en nette progression. Toutefois, le terme « boisement » recouvre toutes sortes de formations, dont certaines ressemblent plus à des cultures d'arbres qu'à des espaces forestiers. Or, l'intérêt écologique d'un bois tient pour beaucoup au mode d'entretien dont il fait l'objet. Si l'on prend par exemple le cas des peupleraies très fréquentes dans les vallées, beaucoup d'entre elles sont exploitées de manière intensive : arbres d'une même classe d'âge alignés en rangs serrés, drainage des sols, amendements, fertilisation, utilisation de désherbants ou coupe intensive entre les rangs, etc. Leur valeur écologique est faible. Inversement certaines peupleraies ont été, pour une raison ou pour une autre, abandonnées et reviennent progressivement à une forêt alluviale avec retour des essences caractéristiques

(chêne pédonculé, frêne, aulnes, saules...), diversification des strates de végétation, présence de chablis et de bois mort... Progressivement l'écosystème se complexifie et s'enrichit en espèces. Cependant, hormis quelques types de forêts à caractère très naturel, les boisements ne constituent pas l'un des milieux les plus remarquables en termes d'accueil d'espèces rares.

Enfin, un autre élément essentiel à la valeur patrimoniale des espaces boisés est la superficie qu'ils recouvrent. Les bois isolés sont plus pauvres en espèces que les bois attenants ou situés à proximité d'ensembles forestiers.

Compte tenu de ces éléments, la création de boisements dans le cadre d'aménagements écologiques de carrières ne doit pas être considérée comme une priorité. Mais en pratique la demande de boisements est assez forte et de nombreux aménagements en prévoient. On essaiera ici de montrer comment valoriser écologiquement les boisements.

En termes de fonctionnement, les boisements constituent une réserve de matières organiques qui est libérée lentement. Comme les haies, ils jouent aussi des rôles d'écrans (brise-vent, anti-bruit, visuels...).

Les boisements abritent une très grande diversité d'invertébrés, les essences autochtones étant en moyenne plus riches que les espèces introduites. Ils constituent aussi un habitat complémentaire pour de nombreuses espèces de zones humides (Insectes, Amphibiens, certains oiseaux d'eau).

Les bois les plus intéressants sont ceux qui ne sont pas entretenus ou entretenus de façon extensive et qui possèdent des arbres vieux ou morts et des chablis (1/3 des oiseaux forestiers nichent dans ces deux types d'habitats)

5.12.2. LA CONCEPTION DES BOISEMENTS SUR CARRIÈRES : PRINCIPES GÉNÉRAUX

Les boisements alluviaux sont un des milieux les plus difficiles à recréer sur des sols remaniés. Outre le problème du temps de croissance des espèces ligneuses, plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- 1) les boisements alluviaux et semi-naturels en général (avec leurs différentes strates et leur composition floristique), sont établis sur des sols anciens ou du moins peu perturbés depuis longtemps ; or la dynamique des sols est très lente et il est impossible de les reconstruire à l'identique ;
- 2) la capacité de dispersion des espèces forestières (surtout les végétaux et les invertébrés) est en moyenne faible et les boisements isolés de



FIG. 103.- Aspect d'un boisement alluvial humide (dessin : M. Pajard).

Qr = Chêne pédonculé (*Quercus robur*)
 Ag = Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*)
 Fe = Frêne commun (*Fraxinus excelsior*)
 Ac = Bourdaïne (*Frangula alnus*)
 Pp = Cerisier à grappes (*Prunus padus*)
 Ps = Prunellier (*Prunus spinosa*)



Pourquoi planter des essences indigènes ?

La recommandation de n'utiliser que des espèces indigènes est, entre autres raisons, fondée sur le fait que les essences établies naturellement supportent une vie beaucoup plus diverse que les essences introduites. On a pu ainsi montrer qu'en Grande-Bretagne⁽³⁸⁾ les 21 espèces (ou genres) d'arbres indigènes accueillent une moyenne de 138,7 espèces d'insectes, contre 16,4 pour 7 espèces introduites. A titre d'exemple, le robinier (*Robinia pseudoacacia*) ne sert d'habitat spécifique qu'à 2 espèces d'insectes contre 423 pour le Chêne pédonculé (*Quercus robur*), 334 pour les deux espèces de bouleaux (*Betula pendula*, *B. pubescens*) ou 141 pour l'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*).

Pourtant les 7 espèces introduites considérées sont plus ou moins naturalisées et d'introduction assez ancienne : marronnier, érable sycamore, noyer, châtaignier... On peut donc imaginer la pauvreté d'essences horticoles récemment introduites.

(38) KENNEDY C.E.S. & SOUTHWOOD T.R.E., 1984 - The number of species associated with British trees : a reanalysis. *J. Anim. Ecol.*, 53 : 455-478.

boisements anciens mettent longtemps à retrouver une composition floristique caractéristique ;

3) les forêts alluviales sont déterminées par des conditions hydriques spécifiques ; on s'en convaincra en constatant la diversité de la végétation en fonction des régimes d'inondation et de battement de la nappe.

C'est pourquoi, avant toute chose, on essaiera de préserver les bois alluviaux les plus naturels existant sur le site. Ceci n'exclut pas la réalisation de boisements à vocation écologique lors des aménagements.

Le reboisement est un sujet largement documenté, mais plus souvent à des fins sylvicoles ou

paysagères qu'écologiques. On essaiera donc de « mimer » au mieux les boisements de type naturel. Dans cette optique, on retiendra les recommandations suivantes :

- 1) conserver si possible les boisements existants ou du moins les arbres les plus vieux ;
- 2) si la conservation est impossible, garder les vieux troncs pour les disposer dans les reboisements ; ils constituent pour la faune des habitats pour la reproduction et l'alimentation ou des abris ;
- 3) laisser faire autant que possible la régénération naturelle, souvent beaucoup plus performante que les plantations ;
- 4) utiliser des essences indigènes ;
- 5) réaliser des boisements humides, fonctionnellement liés aux zones humides (saulaies, aulnaies...) ;
- 6) éviter les plantations monospécifiques et diversifier les essences ;
- 7) favoriser la mise en place d'une structure tridimensionnelle à 4 strates : strate des mousses, strate herbacée, strate arbustive, strate arborée ;
- 8) prévoir des clairières et des layons ainsi qu'une lisière irrégulière et festonnée ;

- 9) connecter les massifs entre eux par des bois ou des haies ;
- 10) démarrer les plantations le plus vite possible après l'exploitation, afin de laisser autant de temps que possible à la croissance des arbres ;
- 11) préparer un sol décompacté et pas trop riche pour limiter la croissance des herbes.

5.12.3. LES PLANTATIONS DE BOISEMENTS SUR CARRIÈRES

Les erreurs à éviter

Pour réussir les reboisements, un certain nombre de causes fréquentes d'échec sont à éviter. Il s'agit :

- 1) d'un sol trop compacté et/ou trop engorgé ;
- 2) d'un choix d'espèces ou de variétés inadaptées aux conditions stationnelles ;
- 3) d'une utilisation de spécimens trop âgés, les

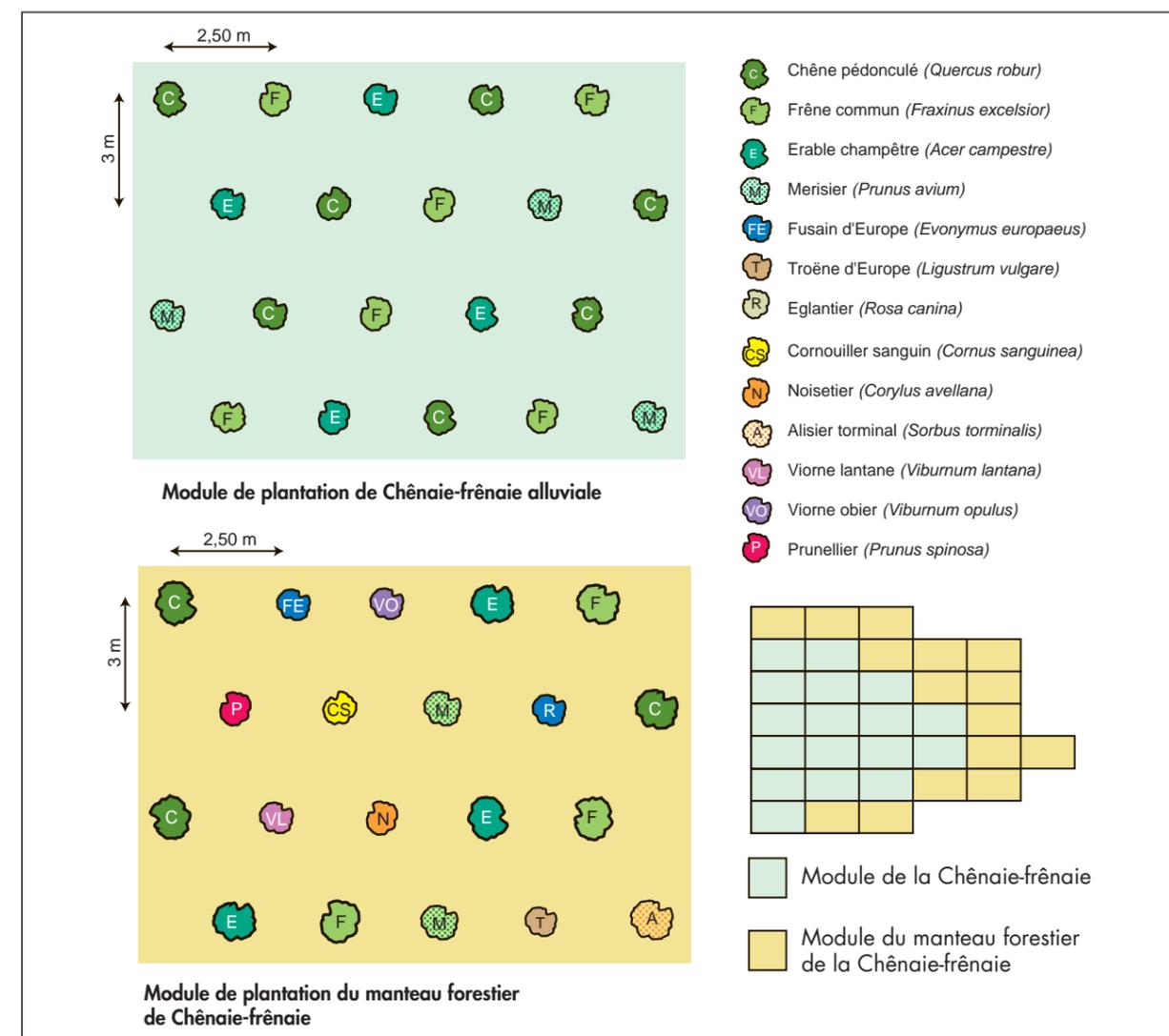
jeunes plants forestiers de 2 ans étant recommandés (à racines nues ou en godets forestiers) ;

- 4) d'une dessiccation des racines lors des plantations ;
- 5) d'un manque de protection contre la dent des herbivores, lapins et chevreuils surtout ;
- 6) d'un manque de suivi de l'entretien entraînant une trop forte concurrence avec les herbacées.

Boisement interne et manteau forestier

Les forêts naturelles présentent avec leur environnement une zone de transition que l'on appelle le manteau forestier. Ce manteau forestier présente une composition plus diversifiée que le boisement interne et en particulier plus d'espèces arbustives. Afin de reconstituer cette disposition naturelle, on veillera à prévoir deux modules de plantation, l'un pour l'intérieur du boisement, l'autre pour le manteau forestier.

FIG. 104.- Exemples de modules pour une chênaie-frênaie alluviale et illustration de leur combinaison pour créer un boisement doté d'un manteau forestier.



5.12.4. PROPOSITIONS DE MÉLANGES D'ESPÈCES DANS DIFFÉRENTES CONDITIONS ÉCOLOGIQUES

Les tableaux ci-dessous proposent des listes d'espèces qui peuvent être utilisées pour tout type de plantations :

1) pour les haies champêtres, on n'utilisera que les essences arbustives ;

2) pour les bandes boisées on utilisera les essences arbustives associées à quelques essences de haut jet ;

3) pour les manteaux forestiers ou les bosquets, on choisira un mélange d'essences arbustives et arborescentes ;

4) enfin, pour l'intérieur des bois, on ne sélectionnera que des arbres.



© Photo Michel Pajard

Photo 109. Plantation forestière avec pose de grillages pour la protection des jeunes plants contre les lapins et chevreuils.

TABLEAU XXXVIII. – Proposition d'essences en conditions écologiques moyennes (zone non méditerranéenne).

Nom français	Nom scientifique	Hauteur	Forme(s) commerciale(s)
ESSENCES DE HAUT JET			
Charme*	<i>Carpinus betulus</i>	10 – 25 m	racines nues godets forestiers
Chêne pédonculé	<i>Quercus robur</i>	25 – 35 m	racines nues godets forestiers
Érable champêtre	<i>Acer campestre</i>	12 – 15 m	racines nues godets forestiers
Frêne commun	<i>Fraxinus excelsior</i>	20 – 30 m	racines nues godets forestiers
Merisier	<i>Prunus avium</i>	15 – 25 m	racines nues godets forestiers
ARBUSTES			
Cornouiller mâle	<i>Cornus mas</i>	2 – 5 m	racines nues
Cornouiller sanguin	<i>Cornus sanguinea</i>	2 – 5 m	racines nues godets forestiers
Eglantier**	<i>Rosa canina</i>	1 – 5 m	racines nues
Fusain d'Europe	<i>Evonymus europaeus</i>	1,5 – 6 m	racines nues godets forestiers
Nerprun purgatif**	<i>Rhamnus cathartica</i>	2 – 4 m	racines nues
Noisetier	<i>Corylus avellana</i>	3 – 6 m	racines nues godets forestiers
Prunellier**	<i>Prunus spinosa</i>	1 – 4 m	racines nues godets forestiers
Troène commun***	<i>Ligustrum vulgare</i>	1 – 2 m	racines nues godets forestiers
Viorne lantane	<i>Viburnum lantana</i>	1 – 4 m	racines nues godets forestiers
Viorne obier	<i>Viburnum opulus</i>	1 – 4 m	racines nues godets forestiers

* à éviter dans les grandes plaines alluviales
 ** espèces épineuses
 *** attention à ne pas planter l'espèce exotique *Ligustrum ovalifolium*, qui est majoritaire dans les haies de type urbain.

TABLEAU XXXIX. – Proposition d'essences en conditions écologiques humides (zone non méditerranéenne).
* espèces épineuses

Nom français	Nom scientifique	Hauteur	Forme(s) commerciale(s)
ESSENCES DE HAUT JET			
Aulne glutineux	<i>Alnus glutinosa</i>	20 – 25 m	racines nues godets forestiers
Bouleau pubescent	<i>Betula alba</i>	15 – 20 m	racines nues godets forestiers
Chêne pédonculé	<i>Quercus robur</i>	25 – 35 m	racines nues godets forestiers
Érable champêtre	<i>Acer campestre</i>	12 – 15 m	racines nues godets forestiers
Frêne commun	<i>Fraxinus excelsior</i>	20 – 30 m	racines nues godets forestiers
Frêne oxyphylle	<i>Fraxinus angustifolia</i>	20 – 25 m	racines nues godets forestiers
Saule blanc	<i>Salix alba</i>	15 – 25 m	racines nues boutures
ARBUSTES			
Bourdaïne	<i>Frangula alnus</i>	1 – 5 m	racines nues godets forestiers
Cerisier à grappes	<i>Prunus padus</i>	5 – 15 m	racines nues godets forestiers
Nerprun purgatif*	<i>Rhamnus cathartica</i>	2 – 4 m	racines nues
Prunellier*	<i>Prunus spinosa</i>	1 – 4 m	racines nues godets forestiers
Saule cendré	<i>Salix cinerea</i>	3 – 6 m	racines nues godets forestiers
Saule des Vanniers	<i>Salix viminalis</i>	3 – 10 m	racines nues godets forestiers
Saule pourpre	<i>Salix purpurea</i>	1 – 6 m	racines nues godets forestiers
Viorne obier	<i>Viburnum opulus</i>	1 – 4 m	racines nues godets forestiers

TABLEAU XXXX. – Proposition d'essences en zone méditerranéenne.

Nom français	Nom scientifique	Hauteur	Forme(s) commerciale(s)
Charme houblon	<i>Ostrya carpinifolia</i>	10 – 15 m	godets forestiers
Châtaignier	<i>Castanea sativa</i>	25 – 30 m	godets forestiers
Chêne pubescent	<i>Quercus humilis ssp. lanuginosa</i>	15 – 25 m	godets forestiers
Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>	25 – 30 m	godets forestiers
Chêne-liège	<i>Quercus suber</i>	15 – 20 m	godets forestiers
Érable à feuilles d'obier	<i>Acer opalus</i>	15 – 20 m	godets forestiers
Érable de Montpellier	<i>Acer monspessulanus</i>	12 – 15 m	godets forestiers
Frêne à fleurs	<i>Fraxinus ornus</i>	15 – 20 m	godets forestiers
Frêne oxyphylle	<i>Fraxinus angustifolia</i>	20 – 25 m	godets forestiers
Peuplier blanc	<i>Populus alba</i>	20 – 25 m	godets forestiers
Pin d'Alep	<i>Pinus halepensis</i>	15 – 20 m	godets forestiers
Pin laricio	<i>Pinus nigra ssp. laricio</i>	35 – 40 m	godets forestiers
Pin maritime	<i>Pinus maritimus</i>	35 – 40 m	godets forestiers
Pin pignon	<i>Pinus pinea</i>	25 – 30 m	godets forestiers
ARBUSTES			
Alaterne	<i>Rhamnus alaternus</i>	3 – 6 m	godets forestiers
Arbousier	<i>Arbutus unedo</i>	8 – 12 m	godets forestiers
Arbre à perruque	<i>Cotinus coggygria</i>	2 – 5 m	godets forestiers
Filaire à feuilles étroites	<i>Phillyrea angustifolia</i>	1 – 2,5 m	godets forestiers
Filaire à larges feuilles	<i>Phillyrea latifolia</i>	1 – 2,5 m	godets forestiers
Laurier sauce	<i>Laurus nobilis</i>	5 – 10 m	godets forestiers
Laurier tin	<i>Viburnum tinus</i>	1 – 2 m	godets forestiers
Myrte	<i>Myrtus communis</i>	2 – 5 m	godets forestiers
Pistachier lentisque	<i>Pistacia lentiscus</i>	4 – 7 m	godets forestiers
Pistachier térébinthe	<i>Pistacia terebinthus</i>	3 – 6 m	godets forestiers
Sumac des Corroyeurs	<i>Rhus coriaria</i>	1 – 3 m	godets forestiers

■ espèces préférant des sols siliceux ■ espèces préférant des sols calcaires ■ espèces des sols alluviaux

5.12.5. LA GESTION ET L'ENTRETIEN DES BOISEMENTS

A priori les boisements à vocation écologique ne nécessitent pas d'entretien particulier. Ce milieu constituant par définition le stade ultime

de la succession, il n'y a pas lieu de le rajeunir. Les successions internes qui ne manquent pas de s'y produire (dépérissements, chablis, ouvertures, fourmilières, régénérations...) font partie de l'équilibre dynamique du « climax » recherché.



PLANCHE XIII. (M. Courcoux). Un boisement humide à vocation écologique doit être très diversifié et ne nécessite pas d'entretien particulier. On peut laisser les arbres morts sur pied, les chablis ou les troncs couchés qui permettent un recyclage de la matière organique, entretiennent des espaces ouverts favorables à la régénération et jouent un rôle dans la biologie de nombreuses espèces en fournissant de nombreuses niches écologiques.

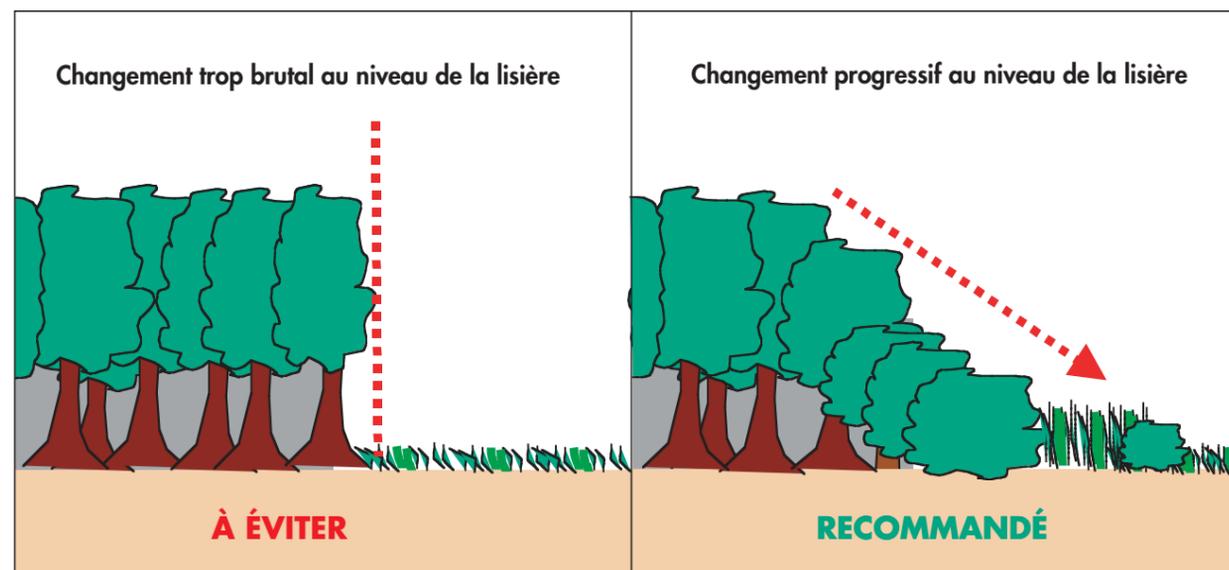


FIG. 105.- Gestion d'une lisière visant à respecter les différentes zones de transition naturelle entre la forêt et les milieux ouverts.

La futaie jardinée : un entretien sylvicole rentable et écologique

La futaie jardinée est un mode de traitement sylvicole s'opposant à d'autres traitements plus répandus en sylviculture comme le taillis sous futaie (TSF) ou la futaie régulière. L'idée principale est de ne pas constituer un peuplement homogène d'arbres du même âge, mais de considérer chaque arbre comme un individu. En d'autres termes, en futaie jardinée, on élève des arbres plutôt que des peuplements d'arbres. La futaie jardinée est une futaie irrégulière où sont représentées toutes les générations d'arbres. C'est le mode de gestion sylvicole qui rapproche le plus un boisement entretenu d'un boisement naturel.

Le mode d'entretien est le suivant :

- absence de coupes à blanc ;
- gestion favorisant la régénération naturelle par rapport aux plantations ;
- interventions moins lourdes que dans les autres types de traitement mais plus fréquentes et plus ponctuelles.

A terme la futaie jardinée devient économiquement rentable avec production annuelle de bois de bonne qualité. Les raisons de cette rentabilité sont les suivantes : les peuplements irréguliers se défendent mieux contre les agressions extérieures (parasites, tempêtes...);

- l'absence de coupe à blanc évite les problèmes d'érosion des sols et de brusque mise à jour qui favorise le développement rapide des espèces envahissantes de friches ;
- la croissance de différentes classes d'âge à l'abri des classes plus anciennes entraîne la production de grumes de meilleure qualité (absence de gourmands par exemple) ;

Les futaies jardinées permettent d'étaler les revenus dans le temps (coupes partielles réalisées annuellement en sélectionnant les meilleurs sujets) alors que la futaie régulière ne rend au mieux que tous les 25 à 30 ans. Outre ces considérations économiques la futaie jardinée est beaucoup plus riche écologiquement et épargne au paysage l'effet des coupes à blanc.

L'aménagement écologique d'une carrière et son entretien peuvent être l'occasion de mettre en œuvre les principes de la foresterie écologique. La foresterie écologique, née en Allemagne au XIXe siècle choisit de ne pas considérer la forêt comme une culture d'arbres mais comme un écosystème complexe, prenant en compte tous les aspects des relations entre les organismes : strate arborée, strate arbustive, strates herbacées et muscinales (strate des mousses), microflore et microfaune du sol, communautés animales. Outre la possible production de bois, sont pris en compte, la formation des jeunes arbres, la diversité floristique, le rôle pour la faune, les mycorhizations, la protection contre l'érosion...

En pratique, la gestion est du type « futaie jardinée », c'est à dire sans coupe à blanc et en maintenant les différentes générations d'arbres. Il faut en revanche dégager régulièrement les clairières et layons.

Photo 110. Gestion en futaie jardinée d'un espace réaménagé sur carrière.



Annexe 1

▲ Expertise écologique

Dans le cadre de l'élaboration d'un projet d'aménagement de carrière, il apparaît indispensable de recueillir préalablement diverses informations sur les caractéristiques du site et de son environnement. Les données à rassembler concernent non seulement le domaine écologique, développé ci-dessous, mais aussi le contexte réglementaire, l'hydraulique et l'hydrogéologie (cf. annexe 2), les activités humaines, le paysage... C'est l'exploitation de l'ensemble de ces informations qui permet d'élaborer un projet cohérent.

1.1. Quels groupes vivants aborder dans l'expertise ?

Dans tous les cas, l'expertise écologique concernera les végétaux vasculaires et les oiseaux nicheurs. Ces deux groupes sont assez bien connus en matière de préférence écologique et de répartition. Les végétaux permettent d'appréhender les conditions écologiques de manière fine, tandis que les oiseaux nicheurs sont de bons indicateurs de la qualité globale de l'écosystème. Dans la mesure où il est question de création d'une zone humide, les Amphibiens (grenouilles, crapauds, tritons...) et les Odonates (libellules) devront aussi être étudiés.

Dans le cas de sites de grande taille pouvant acquérir un intérêt pour les oiseaux migrateurs et hivernants, ces derniers pourront être inventoriés. Il faut savoir, que dans ce domaine, des données fiables ne peuvent être obtenues qu'en cumulant des observations faites sur plusieurs années et à différentes saisons. Il faudra donc se renseigner auprès des associations ornithologiques locales.

L'étude d'autres groupes peut toujours apporter des informations utiles, surtout si elles concernent des espèces d'intérêt patrimonial. On pourra donc compléter avec des données sur les Mammifères (l'étude des Chiroptères ou chauves-souris demande des compétences et un équipement particuliers), sur les Reptiles, sur certains autres groupes d'insectes : Orthoptères (criquets, sauterelles...), Lépidoptères (papillons)... Dans le cas de tourbières, l'étude des Bryophytes (mousses, sphagnes) est indispensable mais demande l'intervention de spécialistes.

1.2. Trois échelles géographiques

Compte tenu des objectifs recherchés, il est utile d'appréhender trois échelles d'approche :

1) **la région** dont la définition dépendra surtout des informations que l'on veut apporter ; en

l'occurrence, elles concernent (1) des données biogéographiques, (2) la migration des oiseaux.

2) **la « petite région naturelle »** qui peut correspondre à un terroir comme la Bassée, le Perthois, le Forez, la Thiérache, la Bigorre... ou à un autre type de secteur géographique comme la basse vallée de la Durance, la zone de confluence Ariège – Garonne, la baie de Somme... Cette « petite région naturelle » doit présenter des caractéristiques relativement homogènes en matière de climat, d'affleurement géologique, de sols, d'hydrologie et de phyto-écologie.

3) **le site lui-même et ses abords immédiats** ; ce niveau est généralement le mieux traité dans les études d'impact.

1.2.1 LES DONNÉES RÉGIONALES UTILES

Le terme « régionales » ne désigne pas particulièrement la région, au sens administratif du terme, mais définit un niveau d'approche assez global. On comprendra mieux en précisant les deux types d'informations utiles.

Quelques éléments biogéographiques

La biologie, comme bien d'autres domaines, se comprend aussi sous l'aspect géographique. Dans de grandes aires, dites « biogéographiques », on reconnaît par exemple des ensembles de plantes relativement identiques. Ceci est particulièrement vraie des zones humides : les zones humides de Bretagne (secteur nord-atlantique) sont, toutes choses égales par ailleurs, différentes de celles de la Provence (secteur méditerranéen) ou de l'Alsace (secteur médio-européen)...

Les limites entre ces secteurs biogéographiques étant progressives (il ne s'agit pas de frontières), on trouve toujours dans une région donnée des éléments biogéographiques originaux parce qu'ils sont en limite d'aire. Les zones humides sont avec d'autres milieux (comme les pelouses naturelles sèches), des bio-



Données à recueillir à l'échelle de la « petite région naturelle »

<p>Protections réglementaires : réserves naturelles, réserves naturelles volontaires, arrêtés préfectoraux de protection de biotope, propriétés ou zones d'acquisition du conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres et des conservatoires régionaux d'espaces naturels, parc naturel régional, zone de protection spéciale, zone spéciale de conservation, zone Ramsar...</p>	<ul style="list-style-type: none"> estimation sommaire de la fréquence de chaque habitat estimation de l'intérêt patrimonial des habitats (accueil d'espèces rares) déterminisme fonctionnel des habitats d'intérêt – groupes d'habitats complémentaires et interdépendants <p><i>Conclusion sur les habitats : les plus remarquables, rares ou bien représentés, habitats déficients ou manquants...</i></p>
<p>Inventaires officiels : zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF) et Zones de grand Intérêt pour la Conservation des populations d'Oiseaux en France (ZICO).</p>	<p>Espèces</p> <ul style="list-style-type: none"> liste des espèces d'intérêt patrimonial répartition de ces espèces selon les habitats <p><i>Conclusion : groupes d'espèces bien représentés, groupes d'espèces déficients</i></p>
<p>Habitats et Fonctionnement écologique :</p> <ul style="list-style-type: none"> liste des grands types d'habitats caractéristique de la région naturelle 	

topes favorables au maintien de telles espèces. La région Ile-de-France est par exemple bien connue à cet égard : les zones humides à l'Ouest (Yvelines) sont riches en espèces très atlantiques, les zones humides au Nord (vallée de l'Oise) ont des espèces boréales ou montagnardes et les zones humides à l'Est (vallée de la Seine en Seine-et-Marne) ont plusieurs espèces d'Europe Centrale qui ne vont pas plus loin vers l'Ouest.

L'expertise écologique, pour succincte qu'elle doive rester en la matière, devra cependant aborder le type de zone humide à attendre en termes biogéographiques et les cortèges d'espèces (en général des végétaux) en limite d'aire de répartition.

Les axes migratoires

Les oiseaux ont la particularité, pour un grand nombre d'entre eux, de migrer massivement selon des axes préférentiels (littoraux, vallées, cols, orientations géographiques...) qui sont bien connus. Il y a des axes migratoires de première importance, d'autres d'importance secondaire.

Il est essentiel de disposer de cette information. On peut par exemple s'interroger sur l'utilité de prévoir des aménagements particuliers pour accueillir les Anatidés en migration si ceux-ci ne survolent la région qu'en petit nombre.

Par ailleurs, de nombreuses espèces sont susceptibles de se mettre à utiliser des sites comme lieu de nidification, si elles ont eu l'opportunité de les reconnaître en période migratoire.

Ces éléments relatifs à la migration des oiseaux sont donc très importants dans le cadre de la mise au point des objectifs.

1.2.2. LES DONNÉES À RECUEILLIR À L'ÉCHELLE DE LA « PETITE RÉGION NATURELLE » ET LEUR UTILITÉ

A l'échelle de la « petite région naturelle » dans lequel s'inscrit la carrière, les données seront principalement obtenues par des enquêtes auprès de personnes compétentes et par dépouillement des documents publiés. Ceci n'empêchera pas de se rendre sur place afin de recenser les habitats, de rechercher des milieux ou espèces d'intérêt non répertoriés et enfin de s'imprégner du fonctionnement écologique du secteur. Les protections réglementaires et les inventaires officiels concernant tout ou partie de cette « petite région naturelle » devront être recensées parce qu'elles donnent un bon aperçu des enjeux écologiques en présence.

Habitats et espèces remarquables

On gardera à l'esprit que l'expertise écologique vise essentiellement à définir les habitats d'intérêt à recréer ou à favoriser et ceci dans le contexte de la « petite région naturelle » où s'insère la carrière. Pour prendre le cas des vallées alluviales, qui est l'environnement le plus fréquent des carrières en eau, l'intérêt des zones humides et de leurs espèces sera généralement le plus important. On recensera donc les différents habitats qui composent ces zones humides (prairies, roselières, marais divers, forêts alluviales...) ainsi que les espèces remarquables de ces habitats. Par ailleurs, on cherchera à comprendre ce qui explique la présence de ces zones humides : affleurement de la nappe, positionnement le long de chenaux d'inondation, substrat de type argileux, communication permanente ou intermittente avec le cours d'eau, etc. Un autre aspect fonctionnel à élucider réside dans les relations entre les habitats : interdépendance, complémentarité, connexions entre eux...

Fonctionnement des écosystèmes

Les différents habitats seront analysés sous l'angle fonctionnel. Comme on l'a déjà vu, le nombre de paramètres susceptibles de qualifier un habitat est impressionnant. Il faut donc savoir, dans un contexte donné, apprécier les facteurs abiotiques dominants. Le but, dans cette réflexion, est de regrouper les habitats en ensembles cohérents d'un point de vue fonctionnel.

En plaine alluviale, ce sera presque toujours les facteurs hydriques qui imposeront le premier degré d'analyse. On pourra par exemple distinguer une série liée aux bords des eaux courantes, une deuxième liée aux zones inondables, une troisième liée à des secteurs d'eaux stagnantes. Le facteur « substrat » intervient aussi souvent :

série sur alluvions sableuses silico-calcaires, série sur sols paratourbeux*. L'intensité de l'exploitation anthropique peut se révéler pertinente aussi : série liée à un mode d'exploitation rural semi-extensif, série liée aux zones bocagères... La liste n'est pas limitative.

Le terme *série* suppose un regroupement d'habitats, en particulier des différents stades successifs se développant sur un même biotope* : stades pionniers, post-pionniers*, mâturs, préclimaciques*...

A ce stade, en recoupant l'analyse avec les deux précédentes réflexions (espèces et habitats), on pourra se faire une idée des séries d'habitats présentant la plus forte valeur patrimoniale et, par voie de conséquence, des paramètres écologiques les plus déterminants. Ces paramètres écologiques ont nécessairement une origine dans la structure

des écosystèmes et leur fonctionnement, sinon actuel, du moins passé. Par exemple, les milieux remarquables peuvent être particulièrement liés au chevelu hydrographique de la plaine d'inondation : celui-ci est constitué de chenaux d'inondation, de noues, de bras morts, de zones de stagnation des eaux, etc., le long desquels se concentre la biodiversité. Ceci peut s'expliquer par les conditions hydriques créées, par l'accumulation d'argile et de matière organique mal décomposée (sols tourbeux, paratourbeux), par la dissémination préférentielle des diaspores le long des voies d'inondation, par une pression anthropique moindre au niveau des secteurs marécageux, etc. Mais on peut aussi imaginer que la valeur patrimoniale soit particulièrement liée à la dissémination d'étangs régulièrement vidangés, ou encore aux substrats siliceux des hautes terrasses.



Données à recueillir sur le site et ses abords

Étude de la flore et de la végétation :

- liste des espèces végétales vasculaires avec mention des statuts de protection et des niveaux de rareté régionaux
- liste des groupements végétaux avec les espèces qui les composent
- cartographie des groupements végétaux
- localisation des espèces rares et protégées
- évaluation et cartographie de l'intérêt des groupements végétaux fondé sur la rareté de leurs espèces et sur leur originalité propre et sur leur rôle dans le fonctionnement global des écosystèmes locaux.

Étude faunistique :

- listes des espèces avec mention des sta-

tuts de protection et des niveaux de rareté régionaux

- répartition des espèces dans les différents habitats
- évaluation et cartographie de l'intérêt des habitats fondé analysé sous l'angle des espèces accueillies et du fonctionnement des écosystèmes.

Synthèse :

- hiérarchisation des différents habitats en fonction de leur intérêt
- explication du fonctionnement du site, globalement et par secteurs, en mettant l'accent sur ce qui détermine les habitats d'intérêt et la présence des espèces remarquables.

Annexe 2

Expertise hydrologique

Rappelons que l'hydrologie est la science des eaux de surface, tandis que l'hydrogéologie est la science des eaux souterraines. Compte tenu de l'imbrication intime entre ces deux disciplines, l'expertise sera généralement commune.

L'expertise hydrologique doit permettre d'apprécier (1) le bilan hydrique et ses variations régulières (hydropériode) et (2) la nature chimique et la qualité des eaux alimentant les plans d'eau et les zones humides.

1.1.1. LE BILAN HYDRIQUE

Qu'est ce qu'un bilan hydrique ?

Le bilan hydrique d'un site exprime sur une période de temps donnée (en général une année), la différence entre la quantité d'eau entrante et la quantité d'eau sortante. Lorsque la différence est positive, le site stocke les eaux en excès, dans des plans d'eau ou des sols engorgés. Lorsque la différence est négative, il y a un déficit hydrique et le site finit par s'assécher. Lorsque le site est à l'équilibre, le volume d'eau moyen stocké reste le même, ce qui signifie que les apports d'eau sont compensés par des pertes rigoureusement égales.

Les eaux rentrant sur un site proviennent des précipitations brutes (pluie, neige, grêle, brouillard...), des apports superficiels (fossés, crues, ruissellement, conduites d'eau...) et enfin des apports souterrains par l'intermédiaire de la nappe. Les pertes en eau résultent de l'évaporation et de la transpiration des végétaux, regroupées sous le terme d'évapo-transpiration, des exportations superficielles (exutoire, pompage, débordement, ruissellement hors du site...) et enfin des infiltrations dans la nappe.

Dans le cas général, la source principale des apports est constituée par les précipitations. Malgré les différences régionales et saisonnières, globalement environ la moitié des eaux ruisselle, l'autre moitié correspondant à l'évaporation du sol et surtout à la transpiration des végétaux. L'établissement d'un plan d'eau ou d'une zone humide suppose une autre répartition au sein du bilan hydrique. Par exemple, dans une cuvette, le ruissellement est impossible ; les eaux ne peuvent que s'infiltrer, s'évaporer ou être transpirées par les végétaux. De plus, la cuvette est le réceptacle des eaux ruisselant des alentours et peut même recevoir des cours d'eau. Si le substrat est imperméable, les infiltrations deviennent impossibles et il ne reste plus que l'évapo-transpiration. Mais celle-ci n'est pas instantanée et du coup les eaux stagnent. Autre exemple, les étangs et zones humides liées à un cours d'eau ; les apports superficiels par ruissellement ou crue ainsi que les infiltrations latérales de l'eau deviennent prépondérants. Dernier exemple, celui où la nappe phréatique est affleurante ou sub-affleurante : dans ce cas les infiltrations sont bloquées et les eaux vont s'accumuler jusqu'à ce qu'elles trouvent une issue de sortie qu'on appelle exutoire.

Différents types de bilans hydriques dans les carrières en eau

Dans le cas des carrières en eau, on peut distinguer plusieurs types selon la nature du bilan hydrique. On ne retiendra que les cas les plus caractéristiques (étant entendu, que dans tous les cas les entrées comprennent les précipitations et les sorties l'évapo-transpiration).

- **Gravière communiquant avec la nappe.**

Lorsque l'exploitation se fait dans la nappe, l'excavation qui en résulte forme un plan d'eau alimenté par celle-ci : on peut même dire que le plan d'eau n'est rien d'autre que la nappe mise à jour.

- **Gravière colmatée.**

Lorsqu'elles vieillissent, les gravières ont tendance à se colmater. Les dépôts imperméables qui se forment sur le fond et sur les berges tendent à isoler progressivement le plan d'eau de la nappe. Celui-ci devient donc de plus en plus dépendant des précipitations et en climat sec, il peut s'assécher.

- **Gravière très proche d'un cours d'eau.**

La gravière très proche d'un cours d'eau présentera un fonctionnement très marqué par ses échanges avec lui : souterrains (nappe), superficiels intermittents (inondations, fortes crues) ou permanents (gravière communiquant avec la rivière).

- **Gravière ou carrière de roche massive hors nappe.** Une carrière peut être hors nappe et cependant en eau : on trouve le cas par exemple au niveau des terrasses anciennes.

Pour ce faire, il faut que le substrat soit peu perméable et que les apports superficiels soient importants (impluvium, ruissellement important, petit cours d'eau alimentant le plan d'eau). De tels sites présentent généralement de fortes variations du niveau d'eau.

- **Plans d'eau des carrières de roches massives.**

Dans le cas des carrières de roches massives, il est souvent plus facile d'un point de vue environnemental, lorsque le gisement exploité est puissant, de s'enfoncer par paliers sous le carreau que de s'étendre sur les terrains voisins. Il en résulte des excavations parfois profondes, dans lesquelles on est obligé de pomper les eaux. Comme le laisse supposer ce pompage, lorsque l'exploitation se termine, l'excavation se remplit lentement et finit par former un plan d'eau. L'origine de ces eaux est généralement multiple : précipitations, eaux circulant dans la roche à travers les pores et les fissures (= nappe diffuse), ruissellements et écoulements provenant des parties hautes.

Ces carrières peuvent être isolées, mais il est fréquent qu'elles se situent sur les coteaux d'une vallée plus ou moins encaissée. Les eaux de pompage, après décantation, se déversent alors dans un émissaire qui rejoint la rivière la plus proche. Dans ce cas, on pourra dans l'aménagement écologique envisager des relations [rivière à plan d'eau] et [plan d'eau à rivière].

Les variations régulières du bilan hydrique (hydropériode)

Un bilan hydrique, calculé pour une année moyenne, ne rend pas compte des variations de celui-ci. En particulier, les entrées et sorties d'eau varient beaucoup selon les saisons : les précipitations varient, la nappe oscille, la chaleur et l'ensoleillement changent...

L'hydropériode décrit la fréquence, la durée et l'intensité des variations du bilan hydrique selon les saisons et les années. Par exemple les crues en plaine alluviale sont présentées selon la probabilité de retour de tel ou tel débit : on parle de la crue quinquennale, décennale, centennale... c'est à dire revenant en moyenne tous les 5 ans, tous les 10 ans, tous les 100 ans. Les oscillations d'une nappe sont des phénomènes présentant une régularité statistique et l'on peut indiquer des niveaux piézométriques moyens pour chaque mois de l'année. Enfin, les

données climatiques mensuelles moyennes permettent d'estimer les périodes d'engorgement des sols ou au contraire de sécheresse.

Les principales données à recueillir

Le travail d'expertise hydrologique doit être réalisé par une structure compétente. Il n'est donc pas utile d'entrer dans le détail du traitement des données. En revanche, il est bon de connaître les données indispensables ou du moins utiles à la conception d'une zone humide.

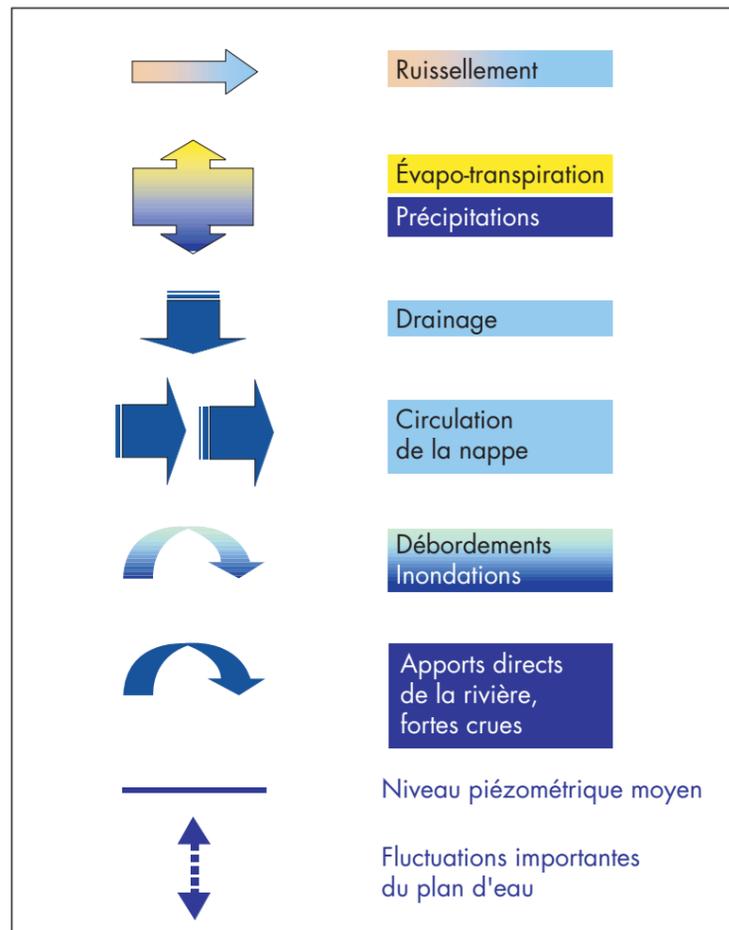
En premier lieu l'expertise hydrologique doit indiquer l'origine des eaux devant alimenter le site : précipitations, nappe, infiltrations, ruissellement... Les variations prévisibles de l'alimentation doivent être précisées. Dans le cas d'une gravière, la connaissance du niveau piézométrique et du marnage moyens est indispensable. En effet, elle détermine le modelé des berges, la hauteur des îles, la localisation des zones de haut-fond... Dans le cas d'un plan d'eau en carrière de roches massives, le bilan des eaux d'exhaure suintant au travers de la roche doit être estimé : il détermine (1) la hauteur à laquelle devrait s'établir le plan d'eau, (2) la nature et le calibrage de l'exutoire et des bassins de décantation, si besoin est. Les bureaux d'études spécialisés disposent de moyens logiciels leur permettant de modéliser le comportement des plans d'eau.

Le deuxième sujet que doit aborder l'expertise hydrologique réside dans la circulation des eaux sur le site et à ses alentours : réseau hydrographique permanent et temporaire, ruissellements... ; les sens d'écoulement doivent être spécifiés. Dans le cas des zones inondables, les informations sur les crues sont indispensables : fréquence des crues selon leur intensité (crues quinquennales, décennales, etc.), principales saisons de crues, chenaux de mise en eau et d'évacuation. Ces informations ont une utilité directe pour la conception de l'aménagement. Citons par exemple quelques cas :

- en zone inondable, le modelé du site doit respecter les chenaux d'écoulement des crues.

- en zone inondable toujours, les chenaux d'écoulement des crues (appelés noues dans le nord de la France) ont fréquemment des sols caractéristiques de zones humides (*sols à gley* : très argileux avec accumulation d'humus parfois de tourbe) : il est intéressant de pouvoir décaper ces sols sélectivement pour les réutiliser dans l'aménagement.

- dans une plaine arable, il est utile de déterminer les ruissellements vers le plan d'eau :



cette donnée permettra par exemple de protéger des zones humides contre la pollution agricole ou le plan d'eau contre des apports excessifs en limons risquant de provoquer un colmatage des berges.

- les travaux d'aménagement peuvent être l'occasion de restituer certaines connexions du réseau hydrographique qui avaient disparu, de réalimenter de petites zones humides en voie d'assèchement...

Enfin, les relations hydrogéologiques entre le site aménagé et ses alentours doivent être traitées. L'excavation de la roche, qu'elle soit alluvionnaire ou massive, modifie les niveaux piézométriques et les écoulements de la nappe. Ces informations sont surtout utiles pour intégrer à l'aménagement des mesures de protection : protection contre l'inondation de secteurs agricoles ou habités par exemple, protection contre le rabattement de la nappe ou de zones humides par exemple.

1.1.2. LA NATURE CHIMIQUE ET LA QUALITÉ DES EAUX

La nature chimique et la qualité des eaux qui alimenteront plans d'eau et zones humides sont des paramètres déterminants que l'expertise hydrologique doit aborder. Les principaux paramètres sont peu nombreux mais ils sont indispensables.

Le pH : on sait que les eaux de précipitation sont acides. Les eaux de ruissellement et les eaux

souterraines sont neutres à basiques sauf en pays de roches siliceuses. Il est important de prévoir le pH du futur plan d'eau, car c'est un des facteurs déterminants pour les êtres vivants.

La teneur en éléments nutritifs : l'expertise doit aborder la question de la « fertilité des eaux » ou niveau trophique*. Ce paramètre est de première importance car il détermine la nature de la végétation qui s'implantera ou que l'on introduira. En particulier, il faut évaluer les risques d'eutrophisation*, c'est à dire de richesse excessive des eaux, car c'est une cause importante de l'échec des créations de zones humides. Le niveau trophique est principalement déterminé par les éléments nutritifs que sont l'azote (sous forme de nitrate, nitrite et ammoniac) et le phosphore. Les sources habituelles de suralimentation en éléments nutritifs sont les engrais agricoles et les rivières chargées en matières organiques et phosphates. Le niveau trophique de la rivière voisine est intéressant quand elle doit être mise en relation avec le site.

Les polluants divers : hormis les concentrations excessives d'azote et de phosphore, il existe de nombreux types de pollution. Les polluants chimiques issus de l'industrie ou de l'agriculture sont devenus un facteur important dans les eaux continentales. Il s'agit de métaux lourds (mercure, plomb, cadmium...), de dérivés fluorés ou cyanhydriques, de pesticides variés, de composés organochlorés, d'hydrocarbures... Même à faible dose, ces polluants sont dangereux pour les êtres vivants. Les sources potentielles de telles pollutions doivent être recensées.

Annexe 3

Fixer des objectifs
écologiques précis

L'objectif premier pour tout projet « écologique » est fondamentalement la volonté de soutenir ou d'améliorer la biodiversité. Le législateur, tant au niveau national qu'europpéen a fixé les grandes orientations en matière d'environnement naturel. La Directive Européenne « Habitats »⁽¹⁾, par exemple, indique dès son premier considérant « *que la préservation, la protection et l'amélioration de la qualité de l'environnement, y compris la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages, constituent un objectif essentiel, d'intérêt général (...)* ».

Cet objectif fondamental d'amélioration de l'environnement naturel doit guider les propositions. Cependant il doit se traduire en objectifs concrets et précis. Il y a là une étape, malheureusement trop souvent oubliée dans beaucoup de projets et qui consiste à cadrer le projet d'aménagement écologique par rapport à des orientations. Se lancer directement dans la description détaillée des habitats en fixant pour tout objectif « site à vocation naturel » - ou toute autres formule équivalente - s'avère aujourd'hui manifestement insuffisant et à l'origine de nombreux déboires.

Exprimer clairement **ce que l'on veut faire** est en effet très utile à plusieurs égards :

- 1) d'abord cela aide à la compréhension globale du projet et à sa présentation aux différents interlocuteurs concernés : il s'agit de fixer une **ligne directrice**.
- 2) cette ligne directrice permettra, aux étapes suivantes (conception puis travaux) de donner forme au projet, y compris en l'adaptant, sans en trahir le fond.
- 3) d'autre part, la recherche d'objectifs réalisables oblige à s'interroger sur de nombreux aspects et en particulier la cohérence globale du projet et la compatibilité entre eux des habitats à créer.
- 4) ensuite, la volonté de réussir dans l'accomplissement d'un objectif amène à tirer parti de toutes les opportunités que le site peut proposer et par là même à faire preuve de créativité ; en effet, les projets d'aménagement sans objectifs précis, sans réflexion sur les opportunités ont tendance à tous se ressembler en prenant la forme de patchwork d'habitats choisis et répartis plus ou moins au hasard.
- 5) enfin, on ne pourra ultérieurement juger du succès, du demi-succès ou de l'échec du projet, que si l'on peut comparer les résultats aux objectifs.

Le travail de proposition d'objectifs incombe en premier lieu à la structure à qui a été confié la conception du projet. Cependant, sur un même site, il y aura presque toujours plus d'un objectif réalisable. Il revient donc aux diverses parties prenantes d'en débattre, en prenant en compte les différents facteurs non écologiques présentés au chapitre 2 (aspects fonciers, « politiques », sociaux, économiques...). En définitive, l'exploitant devra valider une série d'objectifs qui serviront au travail de conception de l'aménagement.

Les objectifs envisageables ne découlent pas « mathématiquement » des expertises et autres informations présentées au chapitre précédent. Il y a un travail d'analyse qui demande des compétences particulières en écologie. La méthodologie d'approche de cette question constitue l'objet de cette annexe. Le souci d'apporter un plus à l'environnement naturel sera abordé sous deux angles.

- ⇒ **premier angle d'approche, l'échelle géographique** : selon les caractéristiques du site et les ambitions du projet, les bénéfices écologiques pourront se mesurer à l'échelle locale ou à une échelle supérieure ne pouvant cependant guère dépasser l'échelle régionale.
- ⇒ **deuxième angle d'approche, le niveau écologique** : l'environnement naturel peut se concevoir au niveau des espèces (faune et flore) ou au niveau des habitats ; à ces deux niveaux, on ajoutera un niveau de compréhension dynamique des phénomènes : le niveau fonctionnel.

Chacun sera libre d'utiliser et de combiner les différentes approches possibles à sa convenance. Cependant, comme elles sont complémentaires, une procédure est proposée pour fixer les objectifs écologiques pratiquement. Enfin, la manière de concevoir et de réaliser des « fiches d'objectifs » est présentée.

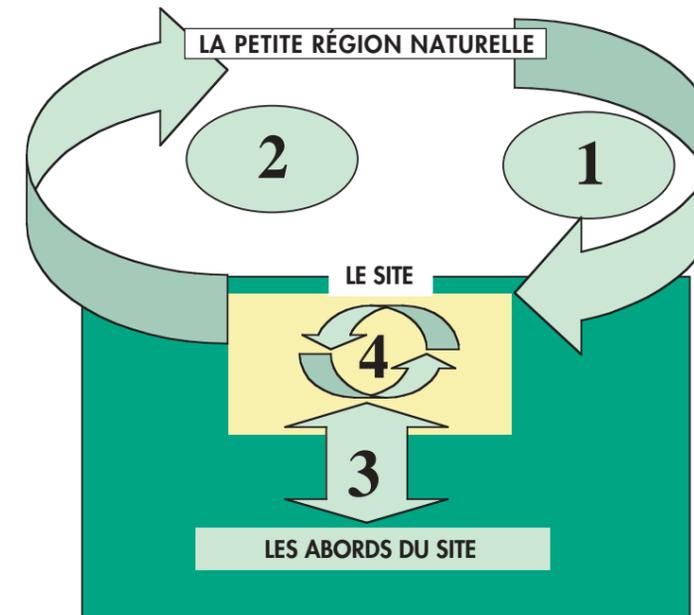
Deux échelles d'approche géographique

Lors des expertises environnementales et plus particulièrement écologique, il a été précisé que les informations devaient s'organiser en deux niveaux de perception :

- ⇒ (1) un niveau régional à micro-régional où il s'agit de comprendre comment le site s'insère dans un réseau déjà existant d'écosystèmes et dans une dynamique hydro-fluviale qui le dépasse largement.

- ⇒ (2) le niveau plus local du site lui-même, (avant et après exploitation) et de ses abords.

Cette organisation des informations est très pratique lorsqu'on en vient au choix des objectifs. Il y a en effet dans la plupart des aménagements écologiques, des choix qui se justifient par rapport à la petite région naturelle dans laquelle



Quatre niveaux de relations écologiques permettant différentes approches détaillées ci-dessous.

<p>1) Approche de la micro-région vers le site.</p> <p>Qu'est-ce que le contexte écologique micro-régional (qui suppose qu'on ait bien expertisé la petite région naturelle du site) peut apporter au site ?</p> <p>Exemples : quelles espèces ou habitats remarquables présents dans la région naturelle peuvent coloniser le site ? la région est-elle sur un axe migratoire majeur ? les conditions d'inondabilité de la vallée sont-elles intéressantes à mettre en valeur ?</p>	<p>3) Approche de l'intégration du site à son environnement proche.</p> <p>Quelle est la meilleure façon d'intégrer le site à ses abords ?</p> <p>Exemples : quelles espèces présentes aux abords pourront coloniser le site, quels habitats d'intérêt peuvent servir de modèle à des aménagements sur le site, le fonctionnement hydrique local peut-il être mis à profit et amélioré, la gravière peut-elle aider à améliorer la qualité des eaux, quelles seront les connexions à établir / rétablir...</p>
<p>2) Approche du site vers la micro-région.</p> <p>Qu'est-ce que le site peut apporter à la petite région naturelle dans laquelle il s'inscrit ?</p> <p>Exemples : peut-on profiter d'espaces de carrières pour donner de la liberté au cours d'eau ? peut-on favoriser des espèces en difficulté, créer des habitats manquant...</p>	<p>4) Approche au niveau du site lui-même.</p> <p>Quelles sont les caractéristiques propres au site qui peuvent donner des idées d'objectifs ?</p> <p>Exemple : espèces et milieux à reconstituer, potentialités du site représentées par la banque de graines du sol, substrats particuliers, conditions hydriques originales...</p>

on se trouve et sur laquelle on prend modèle, d'autres qui correspondent à la volonté de création *ex nihilo* d'habitats originaux, d'autres encore qui correspondent à une exigence d'intégration au milieu environnant... L'expérience montre que les choix d'aménagement répondent à 4 questionnements, 2 répondant à une approche régionale à micro-régionale, 2 répondant à une approche locale. Les encadrés et le schéma ci-dessous explicitent cette méthode.

1.2. Trois niveaux d'approche écologique

L'objectif fondamental des aménagements écologiques de carrières en eau, on l'a déjà mentionné, est de réaliser un site ayant un intérêt écologique et pouvant soutenir les espèces palustres et aquatiques mises en difficulté par la forte régression des zones humides naturelles. On peut donc se donner comme objectif de faire venir sur le site telle espèce. Mais l'écologie nous apprend que les espèces sont liées à des habitats préférentiels : on pourra donc aussi se fixer la création des habitats des zones humides. Cependant les habitats ne sortent pas du néant : ils correspondent à des conditions physiques particulières et ont une structure qui dépend de l'évolution dynamique de la végétation et du mode de gestion qu'on leur applique. Les objectifs peuvent dès lors résider dans la mise en place d'un fonctionnement physique, qui favorisera les habitats que l'on cherche à créer.

On a donc là trois approches dans la définition des objectifs :

- 1) **l'approche par les espèces**
- 2) **l'approche par les habitats**
- 3) **l'approche par le fonctionnement de l'écosystème**

Elles peuvent être utilisées séparément, mais sont souvent complémentaires. Ce sont ces trois façons d'aborder les questions écologiques qui sont présentées ici.

1.2.1 DÉFINIR LES OBJECTIFS EN TERMES D'ESPÈCES

Définition

Dans cette approche, on définit des objectifs d'aménagement en choisissant une *espèce-clef* ou *espèce-cible*. Cette espèce sera le point de départ de la réflexion qui doit mener aux mesures concrètes, en se demandant quelles sont les

⁽¹⁾ Directive 92/43/CEE du Conseil Européen du 21 mai 1992, concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvage.

conditions requises pour que cette espèce colonise, fréquente, se reproduise sur le site. Il s'agit le plus souvent d'espèces animales supérieures (Vertébrés) et, dans le cas des zones humides, surtout d'oiseaux. La reproduction sur le site est en général l'objectif, mais il peut aussi s'agir de l'utilisation hors période de nidification (migration, hivernage).

Soutien aux espèces en difficulté utilisant spontanément les carrières

Sur les carrières, on peut avoir parmi les objectifs, le projet modeste, mais utile, de soutien à une espèce en difficulté. Beaucoup d'espèces, en particulier pionnières ou post-pionnières sont devenues largement tributaires pour leurs effectifs des milieux de substitution que leur procurent les car-

15 espèces de vertébrés dont une partie importante des effectifs se reproduit sur carrière

Nom français	Nom scientifique	Groupe écologique de l'espèce
Crapaud calamite	<i>Bufo calamita</i>	Pionnière des flaques minérales peu végétalisées
Fuligule morillon	<i>Aythya fuligula</i>	Post-pionnière nicheuse dans la végétation herbacée non inondée en bordure de plans d'eau
Grand Cormoran	<i>Phalacrocorax carbo</i>	Nicheuse des boisements humides
Grèbe castagneux	<i>Tachybaptus ruficollis</i>	Pionnière des ceintures de végétation inondées
Grèbe huppé	<i>Podiceps cristatus</i>	Post-pionnière des ceintures de végétation inondées
Guêpier d'Europe	<i>Merops apiaster</i>	Pionnière des talus minéraux
Héron cendré	<i>Ardea cinerea</i>	Nicheuse des boisements humides
Hirondelle de rivage	<i>Riparia riparia</i>	Pionnière des talus rajeunis non loin de plans d'eau
Martin-pêcheur d'Europe	<i>Alcedo atthis</i>	Pionnière des talus rajeunis non loin de plans d'eau
Mouette mélanocéphale	<i>Larus melanocephalus</i>	Pionnière des milieux minéraux peu végétalisés en bordure de plan d'eau
Mouette rieuse	<i>Larus ridibundus</i>	Pionnière nicheuse des milieux peu végétalisés en bordure de plan d'eau
Œdicnème criard	<i>Burhinus oedecnemus</i>	Pionnière des steppes à herbe rase
Petit Gravelot	<i>Charadrius dubius</i>	Pionnière des milieux sablo-graveleux humides
Sterne pierregarin	<i>Sterna hirundo</i>	Pionnière des milieux minéraux peu végétalisés en bordure de plan d'eau
Vanneau huppé	<i>Vanellus vanellus</i>	Nicheuse des prairies et friches humides

Cette approche se justifie par le fait que la dégradation des milieux est d'abord rendue sensible par la disparition ou la régression d'espèces et particulièrement d'espèces emblématiques. C'est pourquoi les espèces-cibles sont presque toujours des espèces menacées. La principale cause de raréfaction des espèces étant la disparition de leur biotope, l'idée est alors la suivante : *recréons les biotopes détruits pour soutenir les espèces qui les utilisent.*

Il faut mentionner un cas particulier du choix d'une espèce-clef : lorsque l'espèce-cible est exigeante en termes de milieu (taille, qualité, diversité...) et se situe au sommet de la pyramide trophique de l'écosystème considéré. Par exemple, dans le cas d'une zone humide, on pourrait citer le Butor étoilé (*Botaurus stellaris*) ou le Busard des roseaux (*Circus aeruginosus*). Dans ces conditions, l'objectif est un défi qu'on se lance, l'espèce devenant en quelque sorte la garantie d'un écosystème sain et complexe et de ce fait d'une biodiversité remarquable.

rières. C'est le cas par exemple de l'Hirondelle de rivage (*Riparia riparia*) : son biotope naturel est constitué par les talus de berges, régulièrement rajeunis par l'érosion, milieux en voie de raréfaction suite à la maîtrise excessive des cours d'eau ; les fronts de taille de gravières fournissent un biotope de substitution, qui assure le maintien de l'espèce dans bien des régions d'Europe. On pourrait aussi citer le cas de la Sterne pierregarin (*Sterna hirundo*). Les radeaux et îlots artificiels mis en place sur les plans d'eau ont permis à cette espèce d'accroître son aire de répartition et de maintenir ses effectifs.

Il faut remarquer que les espèces visées par des aménagements *ad hoc* sont souvent venues s'installer spontanément sur les gravières en exploitation ou abandonnées. Elles ont ainsi démontré une certaine plasticité leur permettant de faire face à une mutation des milieux qui ne leur était pas favorable. En les choisissant pour cible, on ne fait donc qu'accompagner un mouvement naturel de mise à profit

par des espèces de milieux artificiels mais nouveaux. Certaines en profitent d'ailleurs pour étendre leur aire, comme le Petit Gravelot (*Charadrius dubius*) en Grande-Bretagne ou la Sterne pierregarin (*Sterna hirundo*) dans le bassin de la Seine. Le nombre d'espèces dont on sait que les effectifs reçoivent un soutien sinon vital, du moins significatif des carrières en eau est en augmentation.

Mise en pratique

Se fixer comme objectif une ou plusieurs espèces-cibles est souvent pratique et utile. D'abord, la richesse écologique d'une région naturelle donnée est surtout connue par ses espèces végétales et animales remarquables. D'autre part, ce peut être un objectif plus mobilisateur que les ambitions exprimées en termes d'habitats ou d'écosystème : les gens connaissent mieux les espèces ou il est en tout cas plus facile de les leur montrer à l'occasion de réunions d'information. Par exemple, on sensibilisera plus facilement l'opinion en présentant un objectif illustré par un héron pourpré que par une étendue de roseaux.

Cependant, se fixer une ou des espèces-cibles doit conduire à une réflexion sur les habitats, puis sur le fonctionnement global du site. Il y a les habitats indispensables à l'espèce-cible choisie, qu'il faudra mettre en place. Or, il faut s'interroger sur la faisabilité de ces habitats, sur leur cohérence avec d'autres aménagements prévus. Il faut s'assurer que les conditions liées à l'eau, au sol, à la prédation, à la fréquentation... permettront de créer et de pérenniser les habitats souhaités. Le schéma ci-dessous illustre cette démarche.

1.2.2. DÉFINIR LES OBJECTIFS EN TERMES D'HABITATS

Définition

Définir des objectifs en termes d'habitats consiste à annoncer les milieux que l'on compte créer. On choisira par exemple de faire des prairies humides, de créer une aulnaie marécageuse, de mettre en place des îles boisées...

Les habitats sont bien sûr choisis en fonction de leur capacité à accueillir des espèces d'intérêt patrimonial, mais ces espèces sont citées à titre d'exemples. Le cas suivant permettra de comprendre ce qui distingue un objectif exprimé en termes d'espèces et un objectif exprimé en termes d'habitats.

Objectif exprimé en termes d'espèces : *le but est d'assurer sur ce site, la nidification du Héron pourpré : c'est pourquoi une grande roselière sera aménagée.*

Objectif exprimé en termes d'habitats : *le but sur ce site est de créer une grande roselière dont la richesse en oiseaux nicheurs remarquables est connue : le héron pourpré, le blongios nain, le râle d'eau, la rousserolle turdoïde, entre autres pourraient venir nicher. De plus, les roselières sont susceptibles d'accueillir quelques espèces végétales d'intérêt (Butome en ombelles, Grande douve...), ainsi que des insectes peu fréquents.*

Mise en pratique

L'approche des objectifs par habitats ne doit pas faire oublier (1) les espèces fréquentant cet habitat, (2) les conditions physiques indispensables à cet habitat (fonctionnement).



ESPÈCES POUVANT COLONISER, FREQUENTER CET HABITAT

espèces remarquables : Héron pourpré, Busard des roseaux, Blongios nain, Rousserolle turdoïde
autres : fauvettes paludicoles, Bruant des roseaux
 hivernage : Butor étoilé, passereaux

**CHOIX D'UN HABITAT-CIBLE**

exemple : grande roselière inondée

**RÉFLEXION SUR LE FONCTIONNEMENT**

Des milieux complémentaires sont souhaitables : saulaie, chenaux...
Les crues naturelles pourront-elles empêcher l'atterrissement progressif de la roselière...

Voici une liste non exhaustive de cas où se justifie une « entrée » par habitats :

- habitats de grand intérêt écologique connus de la petite région naturelle du site (en particulier s'ils sont en régression, menacés voire récemment disparus).
exemple : transformation du plan d'eau en annexe hydraulique communiquant avec la rivière, avec de riches herbiers aquatiques, dans un secteur où le cours d'eau est très corseté.
- habitats d'intérêt écologique présents en bordure du site ;
exemple : quelques fragments de pelouses calcaires à orchidées peuvent justifier de créer une zone de pelouses calcaires sur le site (à condition de disposer des substrats adéquats).
- habitats d'intérêt potentiel qui sont présents sur le site sous une forme dégradée (dans ce cas des mesures particulières doivent être appliquées comme la conservation d'une partie comme milieu-source, le déplacement d'espèces, le décapage sélectif des sols...)
exemple : le site est largement cultivé, pourtant le long d'une ancienne noue (visible en photo aérienne) il subsiste quelques petites zones marécageuses dégradées où subsistent des espèces d'intérêt des prairies humides ; l'objectif pourra être la reconstitution de prairies humides afin que les espèces en question puissent se développer.
- dans un secteur écologiquement peu riche, habitat source pour des milieux alentours

appauvris en espèces ou habitat-refuge pour les espèces menacées de ces milieux en voie de dégradation.

exemple : dans une zone où les amphibiens sont en régression à cause de la disparition progressive des mares, on pourra avoir pour objectif de soutenir les populations locales d'amphibiens.

- habitats assurant la connectivité interne ou externe du site.
exemple : chenaux permettant de relier des zones humides entre elles, haies se reliant aux haies existantes...
- par rapport à un objectif visant à soutenir une espèce rare ou menacée dans le secteur, on peut être amené à privilégier un seul habitat.
exemple : toutes les zones remblayées en prairies de fauche pour le Rôle des genêts, afin de compenser cet habitat à l'échelle micro-régionale : dans ce cas on peut se dispenser de la création de divers milieux pour se concentrer sur un seul habitat et atteindre la superficie suffisante pour espérer la nidification du Rôle des genêts.

1.2.3. DÉFINIR LES OBJECTIFS EN TERMES FONCTIONNELS**Définition**

Dans une approche fonctionnelle, l'objectif est de laisser jouer au maximum les processus naturels. Dans l'idéal, l'objectif serait un « retour » à un écosystème naturel auto-régulé, permettant de réaliser un site d'intérêt sans avoir à gérer ni entretenir. Compte tenu du caractère largement anthropique* de nos paysages, la référence à un écosystème naturel peut paraître utopique. Elle peut toutefois servir de guide et inspirer une réflexion fonctionnelle utile à toute échelle : relations hydriques d'un site, déterminisme physique des habitats, communications avec la nappe, origine des diaspores colonisatrices, déplacements animaux le long des corridors, possibilités de rajeunissement naturel des milieux, synergie entre les habitats...

En pratique, on appellera « objectif fonctionnel » tout objectif exprimé en termes de dynamique et de structure physique, plutôt qu'en termes biologiques. Dans le cas des gravières situées dans de grandes plaines alluviales, les objectifs de type fonctionnel seront presque toujours liés à la dynamique et à la qualité des eaux.

Voici quelques cas d'objectifs fonctionnels liés aux eaux :

- assurer l'arrivée et l'évacuation des crues sur le site ;
- connexion de la gravière avec un cours d'eau avec l'objectif sous-jacent de faire fonctionner la gravière comme une annexe fluviale ;
- alimentation par la gravière d'une zone humide voisine isolée et en voie d'atterrissement ;
- création d'une noue (chenal permanent ou temporaire d'écoulement des eaux divaguant dans la plaine alluviale) sur le site permettant de (re-)connecter des noues existantes ;
- dépollution biologique des eaux d'alimentation de la carrière.

Les milieux pionniers sur carrière

On constate que l'un des principaux intérêts écologiques des carrières réside dans leurs milieux récents et les espèces pionnières ou post-pionnières qui en bénéficient. L'exploitation des granulats « mime » en quelque sorte le rajeunissement des milieux, assuré dans un système alluvial naturel par les crues et l'érosion des berges. Or, ces milieux pionniers se maintiennent un certain temps puis disparaissent colonisés par des biocénoses plus mûres. Ce n'est qu'au prix de rajeunissements dirigés, qui peuvent être coûteux, que l'on peut les pérenniser. Si ce rajeunissement peut être assuré en jouant sur le fonctionnement hydrique – par exemple en n'isolant pas la gravière des crues –, il est évident que l'on réalise des économies de temps et d'argent, pour un résultat plus « naturel ».

⁽²⁾ sous la responsabilité du RIZA (Ministère Néerlandais des Transports, Travaux Publics et Gestion de l'Eau).

CHOIX D'UN OBJECTIF PRIVILÉGIANT OU RESTAURANT UN FONCTIONNEMENT NATUREL

exemple : recréation d'un chenal d'écoulement des crues

**BÉNÉFICES ATTENDUS EN TERMES D'HABITATS**

*Possibilité de pérenniser les habitats pionniers créés par l'exploitation
 Création d'une gamme d'habitats liés aux zones inondables
 Reconnexion d'une zone humide isolée dans la plaine*

**BÉNÉFICES ATTENDUS EN TERMES D'ESPÈCES**

*Espèces végétales et animales pionnières des milieux alluviaux
 Espèces des marais...*

Mise en pratique de l'objectif fonctionnel

Les préoccupations liées au biotope et à son fonctionnement ne doivent cependant pas perdre de vue les objectifs biologiques de l'aménagement. Si l'on tient à assurer un bon fonctionnement hydrique par exemple, c'est pour favoriser des habitats devenus rares et les espèces qu'ils accueillent.

un objectif nouveau : utiliser les gravières pour améliorer la dynamique fluviale

L'un des modèles de fonctionnements les plus pertinents par rapport aux carrières en eau est celui des plaines alluviales. Étant régi par un facteur dominant, celui des transferts hydriques (longitudinaux, latéraux et verticaux), il est l'un des mieux connus. Il est à l'origine d'écosystèmes complexes et diversifiés, en particulier parce qu'ils sont régulièrement rajeunis par les événements hydrologiques. Cependant, pour que la dynamique fluviale produise ses effets bénéfiques, il faut que le cours d'eau dispose d'un espace de divagation (= espace de liberté, fuseau de divagation, fuseau de mobilité) où jouent les phénomènes morphodynamiques d'érosion, de transport et de sédimentation.

C'est pourquoi, un objectif fonctionnel pour une gravière, située de préférence à proximité du lit mineur, peut être de la réintégrer au fuseau de divagation du cours d'eau. Il se peut même qu'on puisse créer alors cette zone de divagation là où elle n'existe plus et que la gravière permette de reconnecter des chenaux et bras secondaires déconnectés.

On connaît en France des cas de capture de gravière par des cours d'eau (par la Loire en particulier) ou encore des gravières directement inondées par les débordements de la rivière. Par ailleurs, il n'est pas rare que des communications plus ou moins importantes existent entre cours d'eau et carrières et enfin, de nombreuses gravières sont situées dans les plaines d'inondation. Les gravières de Miribel-Jonage à côté de Lyon, sont connectées au chevelu de la plaine alluviale du Rhône (Vieux Rhône, Lône de Bletta) et leur dynamique hydrique est en phase avec celle du fleuve.

La solution plus radicale d'intégration au fuseau de divagation en laissant jouer librement la dynamique fluviale, difficile à organiser au plan administratif et foncier est encore rare. C'est aux Pays-Bas que l'on connaît le plus de cas (réalisés ou en projet) où dans le cadre des programmes de gestion intégrés du Rhin et de la Meuse⁽²⁾, des sablières et des carrières d'argiles participent à la renaturation des plaines alluviales. On peut d'ailleurs imaginer que l'intérêt fonctionnel ne serait qu'accru si c'est un ensemble de gravières qui était concerné.

À noter d'ailleurs que de telles solutions ne dispensent pas de travaux d'aménagement, même si ceux-ci sont alors plus orientés vers l'organisation des flux hydriques et la protection des autres secteurs que vers la création de milieux.

1.3. Méthodologie pour fixer les objectifs en pratique

1.3.1. POUR FIXER LES OBJECTIFS : RECENSER LES OPPORTUNITÉS À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ET À DIFFÉRENTS NIVEAUX ÉCOLOGIQUES.

Pour fixer les objectifs écologiques du projet d'aménagement écologique, on s'interrogera sur les opportunités aux différents niveaux géographiques et écologiques exposés ci-dessus. Le tableau ci-dessous indique les questions à se poser dans les différents domaines. En pratique, il n'est pas nécessaire de répondre à toutes les questions car certaines opportunités paraîtront immédiatement plus évidentes que d'autres.

1.3.2. UNE MÉTHODOLOGIE PRATIQUE POUR INTÉGRER UN SITE À SA RÉGION NATURELLE

Pour qu'un site participe au mieux à la biodiversité de la petite région naturelle dans laquelle il s'inscrit, on propose ici une méthodologie pratique. En dehors de la création *ex nihilo* de nouveaux milieux, les aménagements écologiques prennent toujours au moins en partie en compte ce souci d'intégration.

POUR FIXER LES OBJECTIFS : recenser les opportunités à différentes échelles et à différents niveaux écologiques					
		Trois niveaux d'approche écologique			
		espèces	habitats	fonctionnement	
Deux échelles d'approche géographique	échelle de la petite région naturelle	région >> site	quelles sont les espèces d'intérêt de la région qui pourront coloniser le site ?	quels sont les habitats susceptibles d'apparaître sur le site compte tenu de ce que l'on peut observer dans la région ?	peut-on tirer parti pour le réaménagement du fonctionnement (en général alluvial) de la région : inondations, crues, chevelu du réseau hydrographique, eaux de la nappe de bonne qualité ?
		site >> région	pour quelles espèces de la région rares, en régression, menacées (voire disparues) le site peut-il être utile ?	quels habitats sont en régression, manquent dans la région ? quels sont les habitats des espèces les plus rares de la région présentes ou potentielles sur le site ?	le site peut-il améliorer un dysfonctionnement observable dans le secteur : cours d'eau dénué de fuseau de liberté, excès de nitrates... ?
	échelle du site et de ses abords	intégration locale	quelles espèces présentes aux abords pourront utiliser le site, être favorisées par lui ?	comment intégrer au mieux le site aux habitats environnants : créer des habitats d'intérêt sur le modèle de ceux qui existent à côté, assurer la connexion des milieux (haies, fossés...)?	comment fixer des objectifs qui tiennent compte, qui améliorent les conditions locales : écoulement des crues, réseau hydrographique, dépollution...
		site lui-même	quelles espèces, quels habitats présents à l'état initial pourront recoloniser le site (banque de graines du sol, espaces conservés pour la recolonisation du site) ?	quelles particularité propres au site peuvent être mises à profit : inondabilité, niveau et battement de la nappe, substrats particuliers, topographie... ?	

ÉTAPE N° 1
Recenser les espèces remarquables connues de la petite région naturelle : espèces protégées, espèces des directives européennes, espèces rares.

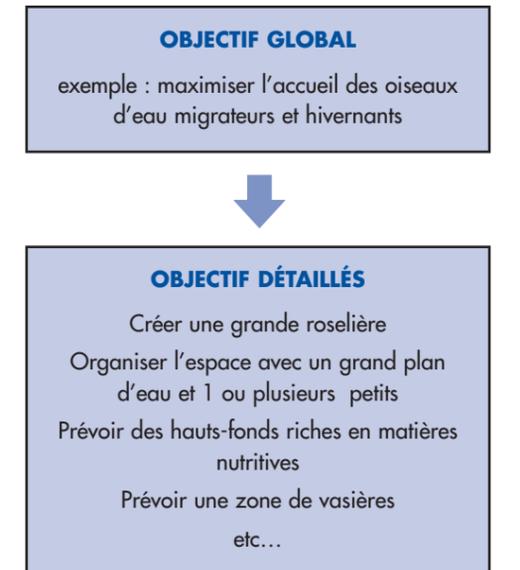
ÉTAPE N° 2
Réunir ces espèces en groupes écologiques, à savoir en espèces utilisant le ou les mêmes habitats. Éliminer les habitats en aucun cas susceptibles d'être créés sur le site. Classer les habitats selon leur richesse en espèces remarquables.

ÉTAPE N° 3
Pour chacun des habitats retenus à l'étape n° 2, les définir en termes dynamiques (stade d'évolution), structurels (habitats linéaires, stratifiés, complexes...), physiques (substrat, pH, niveau hydrique, niveau trophique...).

ÉTAPE N° 4
Regrouper les habitats en ensembles fonctionnels : habitats liés au bocage humide (prairies, haies, bosquets, rus...), habitats liés à la dynamique du cours d'eau (bancs de sables, grèves alluviales, talus dans les alluvions, saulaies blanches...), habitats liés à des inondations régulières (mares, étangs, roselières, aulnaies...), habitats liés au cycle forestier (coupes, jeunes plantations, bois...)... Classer les ensembles fonctionnels selon la valeur patrimoniale (espèces et habitats) qu'ils contribuent à entretenir. Souvent, les espèces et habitats d'intérêt d'une petite région donnée se ramènent à quelques ensembles assez faciles à mettre en évidence.

ÉTAPE N° 5
Chercher si le site pourrait s'insérer dans un ensemble fonctionnel remarquable. Si c'est le cas, on a certainement là l'objectif principal. Si ce n'est que partiellement possible, compléter avec d'autres habitats de valeur et dont la création sur le site est réaliste.

inutile. C'est un cadre qui permettra de revenir à l'essentiel en cas de dérive. Cependant, ces objectifs globaux doivent être décomposés en objectifs détaillés.



Exemples d'objectifs globaux

- 1) compte tenu de la proximité du lit mineur, il s'agit de reconstituer sur cette gravière un fonctionnement et des milieux analogues à ceux des annexes fluviales (bras morts).
- 2) le chenal d'inondation (noue) qui traversait ce site sera reconstitué et l'ensemble des milieux s'organisera autour de cet axe générant des gradients hydriques et de sols (reconstitués).
- 3) étant donné la carence en zone humide du secteur et la localisation à proximité d'une agglomération, ce site cherchera à accueillir la majeure partie des espèces nicheuses de zones humides de cette région afin de réaliser un site à vocation de découverte.
- 4) le milieu phare de cette vallée étant les prairies de fauche humides et des aides pouvant être obtenues pour que des agriculteurs gèrent ce site, l'effort maximal de remblaiement portera sur ce type de milieu.
- 5) compte tenu d'importants volumes de découverte, sur la moitié du site on cherchera à créer un maximum de mares plus ou moins profondes, permanentes ou temporaires, sur sables, sur argiles... L'objectif est d'abord une diversité en amphibiens et libellules, mais aussi en végétaux de ces milieux.

1.3.3. EXEMPLES DE PRÉSENTATION DES OBJECTIFS

La présentation claire des objectifs est indispensable. Elle sert d'abord à les soumettre aux différents acteurs. Ensuite, lorsque les choix sont validés, la présentation des objectifs servira de guide à la conception des aménagements et aux travaux. Rappelons que présenter un objectif, c'est d'abord et avant tout le justifier.

Objectifs globaux et objectifs détaillés

Présenter un ou quelques objectifs généraux englobant ce que l'on veut faire du site n'est pas

6) compte tenu de la présence obligé d'un très grand plan d'eau et du fait que le site est sur un important axe migratoire, l'accueil des oiseaux migrateurs, estivants et hivernants est l'une des priorités de cet aménagement.

1.3.4. EXEMPLES CONCRETS D'OBJECTIFS DÉTAILLÉS

Pour chaque objectif qu'il soit défini en termes d'espèce(s), en termes d'habitat(s) ou en ter-

mes fonctionnels, on présentera une fiche contenant les informations suivantes :

- intitulé de l'objectif
- objectif(s) global(aux) correspondants
- justifications : bénéfices attendus, opportunités, contraintes
- niveau d'intérêt : régional, micro-régional, local (avec commentaire si besoin)
- objectifs en termes fonctionnels, d'habitats et d'espèces

EXEMPLE 1 - Laisser le site dans le champ d'inondation du cours d'eau		
Objectif global correspondant	Réaliser un site aussi connecté que possible à la dynamique fluviale spontanée	
Justifications	Topographiquement et techniquement possible, limiter l'entretien en laissant jouer la dynamique naturelle (l'objectif idéal présenté par ailleurs est de connecter directement le plan d'eau au cours d'eau)	
Intérêt	Local	
OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES		
Aspects fonctionnels et structurels	Habitats	Espèces
Permettre le renouvellement des eaux ; assurer les cycles de matière organique, de l'azote et du phosphore Colonisation spontanée des espèces	Qualité de l'habitat aquatique Habitats pionniers sur alluvions	Richesse spécifique en espèces hydrochores (disséminées par les eaux) Reproduction du Brochet Espèces végétales et animales des milieux alluviaux pionniers

EXEMPLE 2 - Assurer un accueil important pour les oiseaux migrateurs et hivernants		
Objectif global correspondant	Aménagement à vocation ornithologique	
Justifications	Demande de l'association ornithologique régionale qui gèrera le site : accroître les capacités du site voisin qui est en réserve ornithologique ; améliorer l'attractivité du site pour le public ; situation sur un axe migratoire	
Intérêt	Régional à supra-régional pour certaines espèces	
OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES		
Aspects fonctionnels et structurels	Habitats	Espèces
Mieux organiser les zones de repos de gagnage, de mue Améliorer la question du dérangement Attention que les secteurs destinés à l'alimentation (riches en matières nutritives) n'entraîne pas une eutrophisation	Un grand plan d'eau Un ou plusieurs petits plans d'eau Prévoir des vasières et hauts-fonds riche en éléments nutritifs sur l'un des petits plans d'eau	Fuligules (en particulier morillon et milouin), Foulques, Limicoles en migration...

EXEMPLE 3 - Réaliser une grande phragmitaie		
Objectif global correspondant	Soutien aux nicheurs locaux rares Soutien aux espèces végétales rares du secteur	
Justifications	Habitat en régression dans la petite région naturelle Mais espèces animales et végétales des phragmitaies encore bien représentées localement avec quelques raretés à soutenir ou à faire revenir Entreprise ayant déjà réalisé une grande phragmitaie sur un autre site	
Intérêt	Micro-régional (régional en cas de succès parfait)	
OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES		
Aspects fonctionnels et structurels	Habitats	Espèces
Plus la roselière sera grande et de forme ramassée, plus elle pourra accueillir d'espèces exigeantes	Habitats complémentaires : chenaux, clairières aquatiques au sein des roselières, saulaies, prairies humides	Butor blongios (disparu du secteur depuis 20 ans) Rousserolle turdoïde (nicheuse dans le secteur) accueil des migrateurs et hivernants plusieurs espèces végétales rares présentes ou possibles dans le secteur : Butome en ombelles, Grande douve, Peucedan des marais

EXEMPLE 4 - Reproduction du Brochet		
Objectif global correspondant	Réaliser un site aussi connecté que possible à la dynamique fluviale spontanée	
Justifications	Brochet reproducteur sur ce tronçon	
Intérêt	Micro-régional	
OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES		
Aspects fonctionnels et structurels	Habitats	Espèces
Préserver l'inondabilité du site	Prairies inondables	Reproduction du Brochet

EXEMPLE 5 - Reconstitution de l'ancienne noue qui traversait autrefois le site		
Objectif global correspondant	C'est un objectif global en soi	
Justifications	Présence d'une ancienne noue paratourbeuse (actuellement cultivée) sur le site et fragments préservés aux abords	
Intérêt	Micro-régional	
OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES		
Aspects fonctionnels et structurels	Habitats	Espèces
Reconstituer un sol à gley assurer l'alimentation hydrique Attention à l'hydropériode de ce type de milieu : courte exondation estivale.	Roselières et cariçaies sur sols paratourbeux	Grande douve, Peucedan des marais, Fougère des marais... Odonates, Batraciens

EXEMPLE 6 - Nidification de la Sterne pierregarin		
Objectif global correspondant	Il s'agit d'un objectif complémentaire	
Justifications	Forte demande de l'association ornithologique locale Les deux-tiers des effectifs régionaux nichent sur gravières	
Intérêt	Régional	
	OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES	
Aspects fonctionnels et structurels	Habitats	Espèces
Attention à la végétalisation des îlots	Archipel d'îlots minéraux peu végétalisés	Sterne pierregarin (possibles : Sterne naine, Mouette mélanocéphale)

Lexique

ACIDOPHILE qui croît préférentiellement en conditions stationnelles acides (sols et eaux) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

ALCALIN qui a une faible concentration en ions H⁺ et qui par conséquent a un pH basique.

ALLUVIONS dépôts de sédiments (argiles, limons, sables, etc.) déposés par un cours d'eau après un transport sur une longue distance.

AMPHIBIENS (= **Batraciens**) classe d'animaux Vertébrés terrestres très liés au milieu aquatique : tritons, salamandres, grenouilles, crapauds...

ANAÉROBIE qui peut vivre en l'absence d'oxygène.

ANATIDÉS famille d'oiseaux comportant les Canards, les Cygnes et les Oies.

ANNEXES FLUVIALES terme générique regroupant les différents milieux aquatiques temporaires ou permanents créés par la dynamique fluviale : bras secondaires, bras morts, dépressions inondées, chenaux d'écoulement des crues, lônes, noues...

ANNUELLE (plante/espèce) plante dont la totalité du cycle de végétation dure moins d'un an et qui est donc invisible une partie de l'année.

ANTHROPIQUE qualifie les phénomènes qui sont provoqués ou entretenus par l'action directe ou indirecte de l'homme.

ATTERNISSEMENT (1) processus d'accumulation de matériaux dans un système aquatique aboutissant à l'émergence d'une terre. (2) atterrissement ou zone d'atterrissement d'un étang = secteur du rivage où l'eau laisse progressivement la place à la terre.

AULNAIE bois d'aulnes ou riche en aulnes
AUTOCHTONE (espèce) appartenant depuis les temps historiques à la flore ou à la faune d'une région donnée (= indigène). Contraire = allochtone, exotique, introduit.

AVIFAUNE ensemble des espèces d'oiseaux dans un espace donné.

BASSIN VERSANT unité géographique dont toutes les eaux ruissellent et s'écoulent vers le même cours d'eau, dont le bassin versant porte le nom (exemple : bassin versant de la Charente).

BATILLAGE clapotis créé au niveau des berges par le vent ou le passage d'embarcations à moteur.

BATTEMENT DE LA NAPPE mouvement d'oscillation de la nappe phréatique autour de son niveau moyen, entre son niveau le plus haut et son niveau le plus bas appelé étiage.

BENTHIQUE relatif à ce qui vit ou se déroule au fond d'une étendue d'eau.

BENTHOS ensemble des organismes vivant en relation étroite avec le fond des étendues d'eau comportant une zone profonde (c'est-à-dire soustraite à la lumière).

BILAN HYDRIQUE équilibre dynamique entre les apports et les pertes en eau ; les apports proviennent des précipitations (pluie, condensation, neige...), des eaux superficiels (cours d'eau, fossés, ruissellement...) et des entrées souterraines (nappe) ; les pertes sont dues à

l'évapotranspiration, aux exutoires de surface (débordement, trop-pleins, émissaires, pompes...) et aux sorties d'eau par infiltration.

BIOCÉNOSE ensemble des organismes vivants occupant un biotope donné.

BIODIVERSITÉ terme synonyme de "diversité biologique, c'est à dire "diversité du monde vivant" ; classiquement on distingue trois niveaux de biodiversité : la diversité écosystémique (= diversité des milieux et biotopes), la diversité spécifique (diversité des espèces vivantes) et la diversité infraspécifique (diversité génétique au sein d'une même espèce).

BIODIVERSITÉ PATRIMONIALE richesse d'un espace donné (habitat, site d'étude, région, etc.) en espèces d'intérêt patrimonial, c'est-à-dire rares, menacées, en régression.

BIODIVERSITÉ SPÉCIFIQUE voir « richesse spécifique ».

BIOLOGIE (D'UNE ESPÈCE) description du cycle et du mode de vie d'une espèce indépendamment de son milieu (voir écologie d'une espèce).

BIOMASSE quantité de matière vivante animale ou végétale d'un lieu donné.

BIOTOPE ensemble théorique des conditions physico-chimiques définissant un écosystème donné.

BOTULISME intoxication très grave provoquée par l'ingestion d'aliments ou proies contenant les toxines du bacille botulique, bactérie qui se développe en conditions anaérobies.

CALCICOLE se dit d'une plante ou d'un groupement végétal qui se rencontre préférentiellement sur des sols riches en calcium, comme les sols calcaires ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

CARACTÉRISTIQUE (espèce) espèce dont la fréquence est significativement plus élevée dans un groupement végétal déterminé que dans tous les autres groupements.

CARIÇAIE formation végétale de milieu humide dominée par des laïches (genre scientifique : Carex).

CHAÎNE ALIMENTAIRE ensemble des relations d'alimentation (prédation, consommation, décomposition, assimilation) reliant les êtres vivants entre eux.

CHENALISATION ensemble des travaux pratiqués sur un cours d'eau et destinés à le maîtriser en particulier pour la navigation : rectification du tracé, rehaussement des berges, curage du fond...

CHISEL engin de travail du sol que l'on accroche à l'arrière d'un tracteur et destiné à émietter le sol superficiellement ; il se compose d'un bâti muni de dents flexibles.

CLIMAX stade terminal théorique de tout écosystème évoluant naturellement ; le climax est fonction des facteurs physiques, essentiellement du climat et du sol.

COLLET terme de botanique définissant l'anneau qui se trouve à la jonction de la tige et des racines.

CONNECTIVITÉ DES MILIEUX nature, fréquence et intensité des relations unissant entre eux deux milieux de même type (par exemple des zones humides par l'intermédiaire de la circulation des eaux, des bois par l'intermédiaire de haies, etc.).

CORSETAGE D'UN COURS D'EAU ensemble des travaux destinés à empêcher un cours d'eau de sortir de son lit mineur, l'enserrant progressivement dans un cadre rigide en réduisant son fuseau de liberté.

DÉGRADÉ (site, groupement végétal...) maltraité par une exploitation abusive (perturbation du sol, surpâturage, excès d'intrants agricoles, pollution, drainage, etc.).

DÉNITRIFICATION transformation des nitrates en azote gazeux ou en oxyde d'azote, réalisée par des bactéries en conditions anaérobies, dans des eaux ou des sédiments gorgés d'eau ; ce fonctionnement caractéristique des zones humides permet de diminuer la teneur en nitrates des sols, aujourd'hui très élevée.

DIRECTIVE EUROPÉENNE texte adopté par les États membres de l'Union européenne prévoyant une obligation de résultat au regard des objectifs à atteindre, tout en laissant à chaque État le choix des moyens, notamment juridiques, pour y parvenir. Chaque État doit rendre son droit national conforme à une directive européenne.

DIRECTIVE EUROPÉENNE « OISEAUX » directive 79-409 / CEE du Conseil du 2 avril 1979 concernant la conservation des oiseaux sauvages. Elle organise la protection des oiseaux dans les États membres et celle de leurs habitats.

DIRECTIVE EUROPÉENNE « HABITATS » directive 92-43 / CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels (ne pas confondre avec les habitations) ainsi que de la faune et de la flore sauvages. Elle prévoit la constitution d'un réseau de sites (le réseau Natura 2000) abritant les habitats naturels et les habitats d'espèces de faune et de flore sauvages d'intérêt communautaire. Elle comprend notamment une annexe I (habitats naturels), une annexe II (espèces animales et végétales) pour lesquels les États membres doivent désigner des Zones Spéciales de Conservation et une annexe III relative aux critères de sélection des sites.

DÉTRITIVORE qui se nourrit de matières organiques dérivant d'organismes morts.

DYNAMIQUE FLUVIALE ensemble des phénomènes relatifs aux variations de l'écoulement des eaux d'un cours d'eau dans le temps et dans l'espace.

ÉCOCOMPLEXE ensemble d'écosystèmes liés les uns aux autres au sein d'un paysage donné.

ÉCOLOGIE (d'une espèce) rapports d'une espèce avec son milieu ; ensemble des conditions préférentielles de ce milieu dans lequel se rencontre cette espèce (voir biologie d'une espèce).

ÉCOLOGIE (SENS GÉNÉRAL) science étudiant les relations des êtres vivants avec leur environnement et des êtres vivants entre eux ; d'une manière générale, une approche écologique est celle qui vise à saisir le fonctionnement du monde vivant.

ÉCOLOGUE spécialiste de l'écologie.

ÉCOSYSTÈME système ouvert défini approximativement dans l'espace et dans le temps et modélisant l'ensemble des relations des êtres vivants entre eux et des êtres vivants avec l'environnement physico-chimique ; le concept est opérationnel à des échelles très variables (ex. : forêt tropicale, mare temporaire, souche en décomposition...).

ÉCOSYSTÈME relatif à l'écosystème.

ÉCOTONE zone de transition progressive entre deux écosystèmes voisins.

ÉDAPHIQUE qui concerne les relations sol/plante.

ESPACE DE LIBERTÉ voir fuseau de liberté.

ESPACE DE MOBILITÉ voir fuseau de liberté.

ESPÈCE unité fondamentale de la classification des êtres vivants, dénommée par un binôme scientifique international composé d'un nom de genre suivi d'un nom d'espèce (ex : Homo sapiens).

ÉTIAGE niveau le plus bas d'un cours d'eau, d'une nappe ou d'un plan d'eau.

ÉTRÉPAGE action de décaper les quelques dm superficiels pour rajeunir le milieu et sans provoquer de bouleversement du sol. Le terme s'emploie fréquemment à propos des tourbières.

EUTROPHE relatif à un sol ou une eau riche en éléments nutritifs permettant une forte activité biologique.

EUTROPHISATION enrichissement naturel ou anthropique d'une eau en matières nutritives dissoutes (nitrates, phosphates, sels minéraux, etc.). Le terme prend de plus en plus la connotation d'enrichissement excessif.

FLORE ensemble des espèces végétales rencontrées dans un espace donné (voir végétation).

FLUER à propos des argiles ou des marnes, se répandre progressivement sous l'effet de glissements internes.

FORMATION VÉGÉTALE type de végétation défini plus par sa physiologie que sa composition floristique (ex. : prairie, roselière, friche*, lande...); ce terme renvoie en général à une description moins fine de la végétation que celui de "groupement végétal".

FRAYER verbe réservé à la reproduction des poissons : dépôts des œufs par la femelle et fécondation de ceux-ci par le mâle.

FRAYÈRE lieu où viennent frayer les poissons.

FRICHE formation se développant spontanément sur des sols perturbés abandonnés.

FUSEAU DE DIVAGATION voir fuseau de liberté.

FUSEAU DE LIBERTÉ espace dans lequel les sédiments alluviaux peuvent être remobilisés par les mouvements latéraux et longitudinaux des flux d'eau. En théorie, c'est l'espace dans lequel peut divaguer le cours d'eau au gré des modifications du lit mineur : progression des méandres d'amont en aval, réutilisation d'un chenal délaissé, abandon du bras principal pour un bras secondaire, etc. En pratique, même dans les plaines inondables, le lit mineur est souvent endigué et les divagations du cours d'eau sont contrôlées. L'énergie qui ne peut pas se dissiper dans ces mouvements latéraux, est alors dérivée dans le surcreusement du lit et l'érosion des berges.

GLEYS type de sol présentant un engorgement permanent d'un de ses horizons ; l'ambiance réductrice (pauvre en oxygène) induit une coloration grisâtre à bleu verdâtre, caractéristique du fer réduit (au contraire du fer oxydé qui est couleur rouille).

GRANULOMÉTRIE classement des matériaux du sol selon leur taille : argiles, limons, sables, cailloux...

GRÈVE terrain plat formé en majorité de sables et graviers et situé en bordure d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau.

GROUPEMENT VÉGÉTAL ensemble de végétaux différents qui constituent une unité de végétation relativement homogène en colonisant un même milieu. (synonyme : phytocénose).

HABITAT (AU SENS ÉCOLOGIQUE) environnement physico-chimique et biologique dans lequel vit et se reproduit une espèce ou une communauté d'espèces.

HALOPHILE qui croît exclusivement ou préférentiellement sur des sols contenant des chlorures, en particulier le sel (NaCl).

HÉLOPHYTE forme biologique des plantes croissant enracinées dans la vase, dont les organes pérennants (bourgeons d'hiver) passent la mauvaise saison submergés, mais dont les parties supérieures sont aériennes.

HERBACÉ qui à la consistance souple et tendre de l'herbe ; on oppose en général les plantes herbacées aux plantes ligneuses.

HUMIFÈRE qui est riche en humus.

HUMUS matière organique de couleur foncée provenant de la décomposition des débris végétaux jonchant le sol.

HYDRO- préfixe signifiant "relatif à l'eau"
HYDROGÉOLOGIE branche de l'hydrologie spécialisée dans l'étude des eaux souterraines.
HYDROLOGIE étude scientifique des eaux naturelles (nature, formation, propriétés physico-chimiques).

HYDROMORPHE (SOL) sol subissant un engorgement temporaire ou permanent.

HYDROPÉRIODE variations du volume d'eau au cours d'une période donnée ; par exemple sur une année, on définit le niveau moyen annuel d'un plan d'eau, son niveau moyen des plus hautes eaux, son niveau moyen des plus basses eaux...

HYDROPHYTE forme biologique des plantes aquatiques dont les organes assurant la pérennité de l'espèce passent la saison défavorable sous le plan d'eau.

HYDROSYSTÈME ALLUVIAL ensemble des écosystèmes d'une plaine alluviale inondable qui sont reliés entre eux, constamment ou périodiquement, par les eaux superficielles et souterraines.

HYGRO- préfixe signifiant "relatif à l'humidité".

HYGROPHILE se dit d'une plante ou d'un groupement végétal ayant besoin de fortes quantités d'eau tout au long de son développement et croissant en conditions très humides (sol inondé en permanence) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes

IMPLUVIUM bassin drainant les eaux de ruissellement qui s'écoulent aux alentours.

INFRASPÉCIFIQUE relatif à un niveau de la classification inférieur à celui de l'espèce (sous-espèce, forme, variété...).

INTERNUPTIAL chez les animaux, relatif à ce qui se déroule en dehors de la période de reproduction.

INTERSTITIEL qui est localisé dans les interstices du sol ou du substrat.

INTRANTS terme d'agriculture désignant l'ensemble de ce qui est apporté artificiellement aux cultures : engrais, pesticides, etc.

INVERTÉBRÉS ensemble des animaux dépourvus de colonne vertébrale. Les Invertébrés constituent l'immense majorité du Règne Animal et en leur sein les Insectes sont largement majoritaires.

JONCAIE formation végétale sur sol humide, dominée par des joncs coloniaux.

LANDE formation végétale caractérisée par la dominance d'arbrisseaux coloniaux (ex : lande à bruyères, lande à ajoncs...).

LÉPIDOPTÈRES ordre d'insectes correspondant aux papillons.

LIGNEUX formé de bois ou ayant la consistance du bois ; on oppose généralement les espèces ligneuses (arbres, arbustes, arbrisseaux, sous-arbrisseaux) aux espèces herbacées.

LIMICOLES *limicole* signifie qui se nourrit sur la vase. Lorsqu'il s'agit d'oiseaux, ce sont des chevaliers, bécasseaux, gravelots, avocettes, courlis, barges..., que l'on classait autrefois avec les hérons ou les cigognes dans les échassiers.

LITHOSOL sol extrêmement superficiel se formant à la surface de roches dures.

LITIÈRE couche d'accumulation de matière organique morte, essentiellement d'origine végétale.

MACROPHYTES végétaux pluricellulaires visibles à l'œil nu.

MAGNOCARICAIE formation végétale de milieu humide dominée par de grandes laïches (= carex).

MANTEAU (forestier) végétation linéaire essentiellement arbustive située en lisière de forêt.

MARAIS biotope caractérisé par la présence d'un sol organo-minéral inondé ou gorgé d'eau en permanence et recouvert par une végétation caractéristique, d'hélophytes en particulier.

MÉGAPHORBAIE formation végétale de hautes herbes se développant sur des sols humides et riches.

MÉSO-EUTROPHE catégorie trophique intermédiaire entre mésotrophe et eutrophe.

MÉSOPHYTE se dit d'une plante ou d'un groupement végétal croissant préférentiellement en conditions hydriques intermédiaires entre mésophile (voir ce mot) et hygrophile (voir ce mot) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

MÉSO-OLIGOTROPHE catégorie trophique intermédiaire entre mésotrophe et oligotrophe.

MÉSOPHILE se dit d'une plante ou d'un groupement végétal croissant préférentiellement en conditions moyennes, en particulier d'humidité et de sécheresse ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

MÉSOTROPHE moyennement riche en éléments nutritifs et induisant une activité biologique intermédiaire.

MÉTAPOPULATION ensemble démographique composé de populations géographiquement distinctes d'une espèce donnée, reliées entre elles par la dispersion d'individus et formant un ensemble génétique viable et cohérent (exemple : ensemble des populations de grenouilles colonisant les mares d'un secteur) ; l'isolement des populations met en péril l'ensemble de la métapopulation.

MOSAÏQUE ensemble de communautés végétales, de peuplements et de sols différents, coexistant en un lieu donné et étroitement imbriqués.

MULTIPLICATION VÉGÉTATIVE reproduction asexuée des végétaux assurée par des organes comme les racines, les tiges, les rhizomes, les bulbes, etc.

MUSTÉLIDÉS famille de mammifères carnivores, de petite taille, bas sur pattes, au corps étroit et allongé, et à belle fourrure, généralement nocturne (belette, blaireau, fouine, hermine, loutre, martre, putois, vison...)

MYCORHIZATION phénomène d'association par symbiose entre un champignon à longs filaments (= mycorhize) et les racines de certaines plantes.

NITROPHILE se dit d'une plante ou d'un groupement végétal croissant sur des sols riches en composés azotés, généralement des nitrates ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE niveau en dessous duquel le substrat (sol, roche, remblai...) est saturé en eau.

NOUES zones d'écoulement préférentiel des eaux de crue dans une plaine inondable, autrefois généralement exploitées en prairies traversées par un chenal (le terme de noue ne désigne parfois que ce chenal lui-même).

ODONATES ordre d'insectes à peu près assimilable aux libellules.

OLIGOTROPHE très pauvre en éléments nutritifs et ne permettant qu'une activité biologique réduite.

ORTHOPTÈRES ordre d'insectes regroupant les criquets et sauterelles.

OURLET (forestier) végétation herbacée et/ou de sous-arbrisseaux se développant en lisière des forêts ou des haies.

PALUDICOLE qui vit dans les milieux palustres.

PALUSTRE qui est relatif aux marais.

PARATOURBEUX (sol) sol riche en matières organiques plus ou moins décomposées mais où l'engorgement n'est pas aussi permanent que dans un sol tourbeux.

PÉDOLOGIE branche de la géophysique appliquée qui étudie les caractères physico-chimiques et biologiques des sols ainsi que leur évolution et leur répartition géographique.

PÉLAGIQUE relatif à ce qui vit ou se déroule en pleine eau.

PELOUSE formation végétale basse, herbacée et fermée, dominée par les graminées. Les pelouses se distinguent des prairies par le fait qu'elles sont situées sur des sols plus pauvres en nutriments et qu'elles existent et se maintiennent souvent indépendamment de l'action de l'homme (pas ou peu fertilisées - pas de fauchage - éventuellement un pâturage extensif) en raison de conditions extrêmes de sol et de climat, ne permettant pas le développement de ligneux.

PÉRIPHYTON algues unicellulaires se développant sur divers types de supports (particules sédimentaires, organes végétaux...).

PH *potentiel hydrogène* = mesure logarithmique de la concentration en ions H + d'une solution, sur une échelle allant de 0 à 14. Un pH < 7 indique un milieu acide, un pH > 7 indique un milieu basique (= alcalin). Les sols et autres substrats (stériles, remblais) ont généralement des pH variant de 5 à 8.

PHOTOSYNTÈSE production de glucide par les plantes à partir de l'eau et du gaz carbonique de l'air, grâce à la chlorophylle, molécule capable d'utiliser l'énergie lumineuse. La photosynthèse est le processus fondamental de la production primaire de matière organique pour toute la chaîne alimentaire.

PHRAGMITAIE roselière (voir ce mot) dominée par le roseau à balais (= phragmite).

PHYTOPLANCTON plancton végétal (Bactéries, Cyanophytes, Algues).

PIÉZOMÉTRIQUE relatif au niveau d'une nappe d'eau souterraine.

PIONNIER(ÈRE) relatif à une espèce ou un ensemble d'espèces aptes à coloniser des terrains nus.

PLAINE ALLUVIALE zone située de part et d'autre d'un cours d'eau et dont le sous-sol est composé de matériaux (= alluvions) déposés par la rivière.

PLANCTON ensemble des organismes végétaux (Bactéries, Cyanophytes, Algues), ou animaux (Protozoaires...) vivant en suspen-

sion dans l'eau, généralement microscopiques et sans moyen propre de locomotion.

PODZOL sol très pauvre en calcaire, acide, présentant un horizon cendréux délavé très caractéristique et résultant (sur une longue période de temps) d'importants écoulements d'eau du haut vers le bas (lessivage) soit parce que le sol est très sableux, soit parce que le climat est très pluvieux.

POSTNUPTIAL chez les animaux, relatif à ce qui se déroule juste après la période de reproduction.

PRAIRIE formation végétale herbacée, fermée et dense, dominée par des espèces graminées (graminées, joncs, laïches...) et faisant l'objet d'un entretien plus ou moins régulier par fauche ou pâturage.

PRÉNUPTIAL chez les animaux, relatif à ce qui se déroule juste avant la période de reproduction.

PRODUCTIVITÉ caractère d'un sol, d'une espèce, d'une formation végétale, etc., qui produit de la matière organique, soit à partir d'éléments minéraux (productivité primaire), soit en recyclant des composés organiques (productivité secondaire).

PROPAGULE n'importe quel organe végétal, sexué ou non, susceptible de se détacher de la plante mère et de la disséminer : graines, fruits, spores, bulbes, fragments de rhizome.

RÉGOSOL sol extrêmement superficiel se formant à la surface de roches meubles comme le sable.

RENDZINE sol peu épais se développant sur des roches calcaires fissurées et caillouteuses.

RHIZOME tige persistante souterraine assurant la multiplication végétative de la plante.

RICHESSÉ SPÉCIFIQUE nombre d'espèces vivant dans un espace donné (habitat, site d'étude, région...); en général on ne tient pas compte des espèces qui ne sont que de passage.

RIPARIAL relatif aux rives d'un cours d'eau ou d'une étendue d'eau (on dit aussi rivulaire).

ROSELIÈRE peuplement dense de grands hélophytes (voir ce mot) du type roseaux (Phragmites, Massette, Canne de Ravenne, Jonc des chaisiers).

RUDÉRAL (ale, aux) se dit d'une espèce ou d'une végétation caractéristique de terrains fortement transformés par les activités humaines (décombres, jardins, friches industrielles, zones de grande culture...).

SALMONIDÉS poissons de la famille du Saumon, de la Truite, de l'Omble chevalier....

SAULAIE formation végétale de bordure de rivière et milieu humide dominée par le Saule (Nom scientifique : *Salix*).

SAUMÂTRE intermédiaire entre les eaux salées marines et les eaux douces.

SCIRPAIE roselière (voir ce mot) dominée par le Scirpe maritime.

SCRAPER engin de terrassement, muni d'une grosse lame destinée à décaper la partie supérieure d'un terrain. Le dispositif permet en même temps le chargement puis le transport et la remise en place de la couche décapée.

SPONTANÉ(E) (espèce/végétation...) qui croît à l'état sauvage dans le territoire considéré.

STATION 1 - étendue de terrain de superficie variable mais généralement modeste, où les conditions physiques et biologiques sont relativement homogènes. 2 - site où croît une plante donnée.

STRUCTURE D'UN SOL mode d'assemblage des particules qui composent un sol, visible à

l'œil nu (exemple : agrégats, grumeaux, sols compactés ou aérés...).

SUBSTRAT terme plus général que sol et correspondant à tout support sur lequel peut se développer la végétation : sol, remblai, roche et même eau.

SUCCESSION VÉGÉTALE suite de groupements végétaux se succédant naturellement au cours du temps en un lieu donné.

TEXTURE D'UN SOL distribution granulométrique des particules et grains minéraux formant un sol (exemple : sable, limon, argiles...).

THERMOPHILE se dit d'une plante ou d'un groupement végétal qui croît préférentiellement dans des sites chauds (et généralement ensoleillés) ; par extension, se dit de ces conditions elles-mêmes.

TOURADON grosse touffe atteignant 1 m de hauteur résultant de la persistance au cours des années des feuilles basales et de la souche de certaines plantes herbacées (ex : touradons de carex au bord des eaux).

TOURBE couche organo-minérale du sol formée au sein de nappes d'eau permanentes et caractérisée par une forte teneur en matières organiques et riche en débris végétaux du fait du ralentissement de leur décomposition dû aux conditions anaérobies.

TOURBIÈRE étendue marécageuse dont le sol est exclusivement composé de matière organique végétale non totalement décomposée (tourbe).

TROPHIQUE qui concerne la chaîne alimentaire ou la richesse en éléments nutritifs assimilables par les plantes (nitrates, phosphates, carbonates...).

TURBIDITÉ (des eaux) caractère d'une eau trouble.

TYPHIAIE formation végétale de milieu humide de type roselière dominée par la massette (genre scientifique : Typha).

UBIQUISTE qui vit dans une grande diversité d'habitats, en conditions très variées. Il s'agit souvent d'espèces ayant de faibles exigences écologiques, donc banales.

VÉGÉTATION ensemble des groupements végétaux présents dans un espace donné.

VERTÉBRÉS ensemble des animaux dotés d'une colonne vertébrale, à savoir les Poissons, les Amphibiens, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

VIVACE (plante/espèce) plante dont le cycle de végétation dure plus de deux années

ZOOPLANCTON plancton animal.

VÉGÉTAUX VASCULAIRES végétaux doté de vaisseaux conduisant la sève, à savoir les fougères et plantes voisines (= Ptéridophytes) et les plantes à graines (Conifères et plantes à fleurs et fruits ou Angiospermes). Ces végétaux sont ceux que l'on trouve dans les flores générales et qui sont systématiquement étudiés dans les études d'impact. On emploie parfois le terme impropre de « végétaux supérieurs ». Les végétaux non vasculaires, dont l'étude demande des compétences particulières, sont les Bactéries, les Cyanobactéries, les Algues, les Lichens et les Bryophytes (mousses et plantes voisines).

ZONE HUMIDE secteur où la nappe se trouve, au moins une partie de l'année, proche de la surface (au-dessus ou au-dessous) ; il en résulte des milieux aquatiques ou inondables.

▶ Choix de références bibliographiques

- ANDREWS J., KINSMAN D., 1990.**– *Gravel pit restoration for wildlife ; vol. 1 : a practical manual ; vol. 2 : site managers' guide*. Tarmac Quarry Product, The Royal Society for the Protection of Birds (RSPB). 184 p. (vol.1) + 31 p. (vol.2).
- ATELIER TECHNIQUE DES ESPACES NATURELS, 1991.**– *Accueillir les oiseaux d'eau*. Ministère de l'Environnement. 37 p.
- AUSSEUR-DOLLÉANS C., 1990.**– *Comment aménager vos sentiers en milieux humides*. Atelier Technique des Espaces Naturels, Ministère de l'Environnement. 61 p.
- BENSTEAD PH., JOSÉ P., JOYCE C. & WADE M., 1999** – *European wet grassland. Guidelines for management and restoration*. RSPB. 169 p.
- BRITISH TRUST FOR CONSERVATION VOLUNTEERS, 1981** – *Waterways and wetlands*. BTCV. 186 p.
- DASNIAS P. (Ecosphère), 2000.**– *Carrières et zones humides*. Comité National de la Charte (Paris). 5 tomes, 134 + 358 + 170 + 129 p.
- DOMMANGET J.-L., 1998.**– *Les libellules et leurs habitats. Caractéristiques générales. Eléments de gestion et de restauration*. Société Française d'Odonatologie (Bois d'Arcy), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. 19 p.
- FUSTEC E. & FROCHOT B., 1994.**– *Les fonctions des zones humides. Synthèse bibliographique*. Lab. Géol. Appl. (Univ. P. & M. Curie, Paris VI), Lab. Ecologie (Univ. Dijon). 134 p.
- GILBERT O.L. & ANDERSON P., 1998.**– *Habitat creation and repair*. Oxford Univ. Press (Oxford, New-York, Tokyo). 288 p.
- HAWKE C.J. & JOSÉ P.V., 1996.**– *Reedbed management for commercial and wildlife interests*. RSPB, BRGA, English Nature & Broads Authority (Eds). The Royal Society for the Protection of Birds publ. 212 p.
- INSTITUT POUR LE DÉVELOPPEMENT FORESTIER, 1991.**– *Plans d'eau. Construction, entretien (5e édition). Forêt - Loisirs et Equipements de Plein Air*. 60 p.
- LEVÊQUE C., 1996.**– *Ecosystèmes aquatiques*. Coll. « Les Fondamentaux ». Hachette Supérieur (Paris). 159 p.
- KOVACS J.-C. & LE BLOCH F. (Ecosphère), 1995.**– *Zones humides et carrières en Ile-de-France*. Union Régionale des Producteurs de Granulats d'Ile-de-France (Paris). 32 p.
- LIGUE SUISSE POUR LA PROTECTION DE LA NATURE (LSPN), 1981.**– *Les gravières. Protection de la Nature, n° spécial II/8*. 24 p.
- MATZ G. & WEBER D., 1998.**– *Guide des Amphibiens et Reptiles d'Europe - Les 173 espèces européennes*. Delachaux et Niestlé (Lausanne, Paris). 292 p.
- MERRITT A., 1994.**– *Wetlands, Industry & Wildlife. A manual of principles and practices*. The Wildfowl & Wetlands Trust (Slimbridge, Gloucester, UK). 182 p.
- MICHELOT J.-L., 1995.**– *Gestion patrimoniale des milieux naturels fluviaux. Guide Technique*. Minist. de l'Env., Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Res. Nat. de France, L'Atelier Technique des Espaces Naturels. 67 p.
- MULHAUSER B. & MONNIER G., 1995.**– *Guide de la faune et de la flore des lacs et étangs d'Europe*. Delachaux et Niestlé S.A. Lausanne - Paris. 336 p.
- TROTIGNON J., 2000** – *Des étangs pour la vie. Améliorer la gestion des étangs (nouvelle édition)*. L'Atelier Technique des Espaces Naturels, LPO. *Gestion des milieux et des espèces ; Cahiers Techniques*, 61 : 70 p.
- TROTIGNON J. & WILLIAMS T., 1990.**– *Favoriser la vie des étangs. L'exemple de la Brenne (Indre)*. Ministère de l'Environnement (DPN), Réserve Ornithologique de La Gabrière, L'Atelier Technique des Espaces Naturels, WWF. 68 p.
- UNION NATIONALE DES FÉDÉRATIONS DÉPARTEMENTALE DE CHASSEURS (ED.), 1983.**– *Aménagement des territoires oiseaux d'eau*. UNFDC, ONC, ANCGE. 48 p.
- YEATMAN-BERTHELOT D. & JARRY G., 1994.**– *Nouvel Atlas des Oiseaux Nicheurs de France - 1985-1989*. Société Ornithologique de France. 775 p.

▶ Table des matières

1 L'ÉCOLOGIE DES CARRIÈRES EN EAU	9
1.1 - QUELQUES NOTIONS D'ÉCOLOGIE UTILES À L'AMÉNAGEMENT ÉCOLOGIQUE DES CARRIÈRES ..	10
1.1.1 - <i>qu'est-ce qu'un écosystème ?</i>	10
1.1.2 - <i>la biodiversité</i>	11
1.1.3 - <i>la productivité des écosystèmes</i>	11
1.1.4 - <i>le devenir des écosystèmes : successions, perturbations</i>	12
1.1.5 - <i>quelques éléments d'écologie du paysage</i>	14
1.1.6 - <i>l'hydrosystème alluvial</i>	15
1.2 - LES CONSÉQUENCES PHYSIQUES DE L'EXPLOITATION D'UNE CARRIÈRE	17
1.2.1 - <i>caractéristiques topographiques</i>	18
1.2.2 - <i>caractéristiques des sols</i>	18
1.3 - LA STRATIFICATION VERTICALE ET LE ZONAGE HORIZONTAL	18
1.3.1 - <i>la stratification verticale des communautés aquatiques</i>	19
1.3.2 - <i>le zonage horizontal et les ceintures de végétation</i>	21
1.4 - QUELQUES GROUPES DE PLANTES CARACTÉRISTIQUES DES CARRIÈRES EN EAU	21
1.4.1 - <i>les espèces aquatiques</i>	21
1.4.2 - <i>les espèces annuelles des grèves</i>	21
1.4.3 - <i>les espèces vivaces des berges inondées</i>	22
1.4.4 - <i>les espèces des roselières et cariçaies</i>	22
1.4.5 - <i>les espèces des mégaphorbiaies</i>	24
1.4.6 - <i>les espèces annuelles des friches</i>	24
1.4.7 - <i>les espèces vivaces des friches</i>	24
1.4.8 - <i>les espèces des pelouses sableuses sèches et oligotrophes</i>	24
1.4.9 - <i>les espèces ligneuses des milieux humides</i>	25
1.5 - LES PRINCIPAUX GROUPES D'ANIMAUX DES CARRIÈRES EN EAU	25
1.5.1 - <i>les poissons</i>	25
1.5.2 - <i>les principaux groupes d'oiseaux nicheurs</i>	26
1.5.3 - <i>les oiseaux migrateurs et hivernants</i>	30
1.5.4 - <i>les amphibiens et les carrières en eau</i>	31
2 FIXER DES OBJECTIFS PRÉCIS	33
2.1 - LA DÉMARCHÉ DÉCISIONNELLE ET SON CONTEXTE	34
2.1.1 - <i>mettre en route une démarche de réflexion</i>	34
2.1.2 - <i>les motivations pour un projet d'aménagement écologique ?</i>	36
2.1.3 - <i>la compatibilité de l'aménagement écologique avec d'autres vocations possibles</i>	37
2.2 - ÉVALUER LES OPPORTUNITÉS ET LES CONTRAINTES DU SITE	38
2.2.1 - <i>les caractéristiques du gisement et mode d'exploitation</i>	39
2.2.2 - <i>les opportunités et les contraintes hydrologique et hydrogéologique</i>	40
2.2.3 - <i>les opportunités et les contraintes écologiques</i>	40
2.2.4 - <i>autres données et informations à considérer pour déterminer les objectifs</i>	42
2.3 - DÉFINIR LES OBJECTIFS ÉCOLOGIQUES	44

3	LA CONCEPTION DU PLAN D'AMÉNAGEMENT	45
3.1	LES REMBLAIS	46
3.1.1	le ratio zones émergées / zones immergées	46
3.1.2	choix d'utilisation des remblais disponibles	46
3.1.3	choix et localisation des substrats	48
3.2	L'ORGANISATION DES ESPACES AQUATIQUES	49
3.2.1	nombre et superficies des plans d'eau	49
3.2.2	la forme générale des plans d'eau	50
3.2.3	la sinuosité des contours	51
3.2.4	les îles et îlots	52
3.3	LA DÉFINITION ET LA LOCALISATION DES HABITATS	52
3.3.1	analyser les objectifs en termes d'habitats	52
3.3.2	définir les exigences des habitats	53
3.3.3	cartographier les habitats	53
3.3.4	décrire les travaux de terrassement à réaliser	55
3.3.5	prévoir les travaux de végétalisation	55
3.3.6	la carte hypsométrique et la carte des substrats	56
3.4	L'INTÉGRATION DU SITE À SON ENVIRONNEMENT NATUREL	58
3.4.1	les « réservoirs d'espèces » dans l'environnement	58
3.4.2	l'effet de taille	58
3.4.3	la complémentarité des milieux	58
3.4.4	la connectivité des habitats	59
3.4.5	la perméabilité des frontières du site	59
3.4.6	la protection contre certains effets indésirables des habitats voisins	59
3.4.7	les voies locales de déplacement des animaux sauvages	60
3.5	L'INTÉGRATION HYDRAULIQUE DU SITE	60
3.5.1	les inconvénients d'un site hydriquement isolé	60
3.5.2	connexion hydrique de la carrière selon sa localisation par rapport au réseau hydrographique	61
3.5.3	utiliser un complexe de gravières pour créer une zone de divagation du cours d'eau	64
3.6	LA GESTION DES ACCÈS ET DE LA FRÉQUENTATION	65
3.6.1	les aspects négatifs et positifs de la fréquentation	65
3.6.2	quelle sera la nature de la fréquentation du site ?	65
3.6.3	quelques principes utiles	66
3.6.4	la conception des accès et des cheminements	66
3.6.5	les barrières et écrans naturels	67
3.6.6	assurer la sécurité du public	68
4	LES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT ET DE VÉGÉTALISATION	71
4.1	FAIRE UN AVANT-PROJET DÉTAILLÉ (APD)	72
4.2	ORGANISER LE CHANTIER	72
4.3	LE PROFILAGE DE LA BERGE	73
4.3.1	quelle pente pour les berges ?	73
4.3.2	caler les berges par rapport au niveau piézométrique	75
4.3.3	rechercher les irrégularités	76
4.3.4	la protection contre l'érosion	78
4.3.5	les types de berges particuliers	82
4.4	L'UTILISATION DES SUBSTRATS DISPONIBLES ET LA RECONSTITUTION DES SOLS	84
4.4.1	caractéristiques des principales catégories de substrats des gravières	84
4.4.2	le décapage des terres de découverte	85
4.4.3	le foisonnement	85
4.4.4	la question de l'utilisation de la terre végétale et de la fertilité des sols	86
4.4.5	la conservation des qualités agronomiques de la terre végétale	88
4.4.6	la reconstitution d'un sol	88
4.5	LA VÉGÉTALISATION	90
4.5.1	végétaliser ou laisser faire ?	90
4.5.2	le boisement ou l'engazonnement de base, avec des espèces et variétés horticoles, sélectionnées et commercialisées.	92
4.5.3	le boisement ou l'enherbement avec des espèces naturelles commercialisées	93

4.5.4	la végétalisation à partir de races régionales	94
4.5.5	conseils généraux de végétalisation	95
4.6	LES TECHNIQUES PARTICULIÈRES LIÉES À LA GESTION HYDRAULIQUE	96
4.6.1	les avantages du contrôle hydraulique	97
4.6.2	les différentes situations possibles	97
4.6.3	les systèmes de contrôle des eaux	99
4.6.4	les problèmes de pollution des eaux	101
4.7	L'UTILISATION DES BASSINS DE DÉCANTATION	102
4.8	LES TECHNIQUES PARTICULIÈRES LIÉES À LA RESTAURATION DES ANCIENNES GRAVIÈRES	103
4.9	L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ANIMALES	104
4.10	LES ÉQUIPEMENTS DESTINÉS AU PUBLIC	106
4.10.1	la zone d'accueil	106
4.10.2	les cheminements	106
4.10.3	les équipements d'interprétation du site	108
4.10.4	les équipements d'observation	109
5	AMÉNAGEMENT ET ENTRETIEN D'HABITATS	111
5.1	LES HABITATS AQUATIQUES DES PLANS D'EAU	112
5.1.1	définitions et données écologiques à prendre en compte pour l'aménagement des habitats aquatiques	112
5.1.2	le rôle des habitats aquatiques dans la biodiversité	113
5.1.3	l'aménagement des habitats aquatiques sur carrières	115
5.1.4	la végétalisation des habitats aquatiques	117
5.1.5	l'introduction d'espèces animales en milieu aquatique	117
5.1.6	la gestion et l'entretien des habitats aquatiques	117
5.2	LES VASIÈRES ET LES GRÈVES	119
5.2.1	les données écologiques à prendre en compte pour l'aménagement des grèves et des vasières	120
5.2.2	le rôle des grèves et des vasières dans la biodiversité	121
5.2.3	l'aménagement de grèves et vasières sur carrière	121
5.2.4	la gestion et l'entretien des grèves et vasières	122
5.3	LES FOSSES ET LES CHENAUX	123
5.3.1	les données écologiques à prendre en compte pour l'aménagement des fossés et chenaux	123
5.3.2	l'aménagement des fossés et chenaux sur carrière	125
5.3.3	la gestion et l'entretien des fossés et chenaux	127
5.4	LES CEINTURES DE BERGES	128
5.4.1	les données à considérer dans le fonctionnement des ceintures de berges	129
5.4.2	le rôle des ceintures de berges dans la biodiversité	130
5.4.3	la végétalisation des ceintures de berges	130
5.4.4	la gestion et l'entretien des ceintures de berges	132
5.5	LES ROSELIÈRES À PHRAGMITE COMMUN (<i>PHRAGMITES AUSTRALIS</i>) OU PHRAGMITAIES	133
5.5.1	les différents types de roselières	133
5.5.2	les données écologiques à prendre en compte pour l'aménagement des roselières	135
5.5.3	le rôle des roselières dans la biodiversité	136
5.5.4	l'aménagement des roselières sur carrière	137
5.5.5	la gestion et l'entretien des roselières	142
5.6	LES PRAIRIES	143
5.6.1	les principales données à considérer pour l'aménagement d'une prairie	144
5.6.2	le rôle des prairies dans la biodiversité	144
5.6.3	l'aménagement des prairies sur carrière	145
5.6.4	la gestion et l'entretien des prairies	148
5.7	LES MARES	149
5.7.1	les données écologiques à prendre en compte pour l'aménagement des mares	149
5.7.2	l'aménagement des mares sur carrières	149
5.7.3	la végétalisation des mares	155
5.7.4	les introductions animales dans les mares créées	155
5.7.5	la gestion et l'entretien des mares	155
5.8	LES ÎLES ET LES RADEAUX	155

5.8.1 - les différents types d'îles et leur intérêt écologique	155
5.8.2 - données générales sur la conception et l'aménagement des îles	158
5.8.3 - les « îlots à sternes »	159
5.8.4 - les îles végétalisées	161
5.8.5 - la gestion et l'entretien des îles et îlots	161
5.8.6 - le cas particulier des radeaux	161
5.9 - LES FRONTS DE TAILLE ET MICROFALAISES	162
5.9.1 - le rôle des fronts de taille et microfalaises dans la biodiversité	162
5.9.2 - l'aménagement des microfalaises sur carrière	163
5.9.3 - la gestion et l'entretien des microfalaises	163
5.10 - LES PELOUSES ET LES LANDES SABLO-CAILLOUTEUSES DE TYPE « STEPPIQUE »	164
5.10.1 - les données écologiques à prendre en compte pour l'aménagement des pelouses et landes	164
5.10.2 - le rôle des pelouses et landes dans la biodiversité	165
5.10.3 - l'aménagement des pelouses et landes sur carrières	166
5.10.4 - la végétalisation des pelouses et landes	167
5.10.5 - la gestion et l'entretien des pelouses et landes	167
5.11 - LES HAIES ET BANDES BOISÉES	167
5.11.1 - les données écologiques à prendre en compte pour la constitution des haies et bandes boisées	167
5.11.2 - le rôle des haies et bandes boisées dans la biodiversité	168
5.11.3 - la conception des haies et bandes boisées sur carrières	168
5.11.4 - les haies brise-vent	170
5.11.5 - la gestion et l'entretien des haies	171
5.12 - LES BOISEMENTS	171
5.12.1 - les données écologiques et fonctionnelles à prendre en compte	171
5.12.2 - la conception des boisements sur carrières : principes généraux	171
5.12.3 - les plantations de boisements sur carrières	173
5.12.4 - propositions de mélanges d'espèces dans différentes conditions écologiques	174
5.12.5 - la gestion et l'entretien des boisements	176
ANNEXE 1	179
ANNEXE 2	183
ANNEXE 3	187
LEXIQUE	199
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES	202