

Limites de radiotoxicité des nuages de Tchernobyl

ANDRÉ DOURY

L'accident de la centrale de Tchernobyl refait régulièrement surface dans les débats sur l'environnement. C'est alors souvent l'occasion de voir apparaître, dans les médias en tous genres et dans les déclarations de certaines officines, un véritable déferlement d'inexactitudes et de contrevérités aggravées, de rétentions d'informations et d'omissions pas toujours innocentes. D'ailleurs, on peut regretter que, dans les milieux informés, on se soucie trop peu de l'impact négatif de ces « informations » sur certains publics vulnérables, notamment pour ce qui concerne la qualité de l'environnement.

André Doury a été le chef de la Section d'études de sûreté des sites nucléaires au CEA/IPSN. Il est licencié ès Sciences et détient un certificat de physique du globe (Strasbourg).

Cet article a essentiellement pour but de montrer clairement que l'impact sanitaire d'origine radiologique de l'accident est partout nul au-delà d'une distance (à vol d'oiseau) de 1 800 à 2 000 km et notamment en France, Corse comprise, tandis qu'en deçà de cette distance, cet impact augmente rapidement en direction du site de l'accident, jusqu'à un facteur 10 000 à une dizaine de kilomètres et 10 millions sur le site lui-même.

Avant de procéder à toute évaluation numérique plus précise, il apparaît toutefois nécessaire d'apporter certaines informations techniques de nature à faire disparaître quelques malentendus et idées fausses actuellement fort répandus et qui ont la vie dure.

L'importance de la source de radioactivité

Il est certes intéressant, en particulier pour le public, de rapporter les quantités de radioactivité mises en jeu à celle d'un événement connu comme, par exemple, l'explosion d'Hiroshima. L'ennui c'est que les mélanges ne sont pas les mêmes et que le réacteur en retient 90%. Si l'on se souvient que 1 kilotonne (kt) de TNT est équivalente à $4,18 \cdot 10^{12}$ joules, on sait que 1 kt de TNT vaut exactement 1 160 MWh, soit la production d'une tranche de Tchernobyl pendant 1 h. Il faut donc 15 h d'une telle production pour atteindre la production « Hiroshima », et non deux cents ou cinq cents fois moins comme annoncé dans certains communiqués, sans préciser s'il s'agit d'une présence dans le réacteur ou du rejet dans l'environnement.

Les ordres de grandeur des quantités totales de produits de fission respectivement créées par une explosion et un réacteur nucléaires peuvent être facilement approchés par les correspondances suivantes, valables après 1 h de décroissance ra-

dioactive :

- 1 kt de TNT $\rightarrow 2,0 \cdot 10^{19}$ Bq ;
- 1 W thermique $\rightarrow 3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Au-delà de 1 h de décroissance radioactive, ces relations changent considérablement car les produits d'explosions décroissent plus vite que ceux d'un réacteur. Compte tenu d'un rendement thermodynamique de 30% pour la production d'électricité, le **tableau 1** donne quelques valeurs d'équivalence exprimées en nombre de bombes « Hiroshima » (15 kt) pour quatre catégories de produits de fission parmi les plus importantes, après 1 h de décroissance radioactive. Les fortes valeurs en iode, et surtout en césium et strontium, proviennent d'un effet d'accumulation en fonction de la période qui n'existe que dans le cas du réacteur.

Le « nuage de Tchernobyl »

L'expression le « nuage de Tchernobyl », largement répercutée par les médias et malheureusement souvent reprise dans des milieux pourtant bien informés, non seulement ne correspond à aucune réalité physique mais risque, en outre, d'autoriser des interprétations fâcheuses telles que celle d'un nuage unique monolithique parcourant de grandes distances et traversant les frontières dans son état initial inchangé. En fait, l'explosion survenue le 26 avril 1986 sur la tranche n°4 de la centrale de Tchernobyl a libéré dans l'environnement, et d'abord dans l'atmosphère, le dixième environ de son contenu en produits radioactifs, essentiellement de fission, soit de l'ordre de 10^{19} Bq (l'équivalent de 300 t de radium) dont l'émission s'est étalée sur une dizaine de jours, du 26 avril au 6 mai, et qui se sont répandus sur toute la planète en trois mois. On conçoit facilement que pendant ces dix jours et ces trois mois, où les débits d'émission ont varié entre 1 et 10, des masses d'air contaminées ont quitté le site à des altitudes entre 0 et 2 000 m, et sur des

Tableau 1

Rapports « Tchernobyl-Hiroshima » des produits de fission après 1 h, mis en jeu par l'accident		
Produits	Nombre d'explosions « Hiroshima »	
	dans le réacteur	dans l'environnement
Tous produits	0,36	0,04
iodes + tellures	0,33	0,04
iode 131	31	5
Césium 137	2 000	300
Strontium 90	2 400	96

trajectoires aussi diverses et variables que possible. Ainsi, étant donné la très grande sensibilité des moyens de mesure de la radioactivité, celle provenant de Tchernobyl a pu être détectée à plus ou moins bref délai pratiquement partout, mais d'autant plus faiblement que les délais et l'éloignement étaient grands.

Les délais et l'éloignement ont une importance primordiale car ils conditionnent le degré d'efficacité des différents processus naturels de déconcentration et de décontamination des masses d'air (décroissance radioactive, dilution, diffusion turbulente, dépôts secs en surface, lavages par les précipitations). On verra plus loin qu'au-delà de 1 500 à 2 000 km les niveaux de radioactivité dus à l'accident passent en dessous des niveaux naturels.

Le passage des frontières

Immédiatement après l'accident, quelqu'un aurait déclaré que le « nuage » venant de l'est ne passerait pas les frontières de l'est de la France. On ne connaîtra jamais l'auteur de cette absurdité mais, au lieu de faire de l'esprit en s'en gargarisant bêtement pendant dix ans, les professionnels de l'information auraient mieux fait :

- d'attirer l'attention sur l'effet de l'éloignement qui justifiait, dès les premiers calculs, l'absence de mesures spéciales à prendre en France ;
- d'imaginer, au moins pour ce qui concerne la France, qu'une trajectoire venant de l'est, alors qu'à cette latitude les courants dominants sont d'ouest, avait pu, en contournant une cellule anticyclonique épisodique et en évitant les trois quarts du territoire français, remonter vers la mer du Nord avant de reprendre, à

de plus hautes latitudes, une direction plus normale vers l'est.

L'impact « dix fois plus important en Alsace qu'en Bretagne »

On a pu entendre, sur une chaîne de télévision, que l'impact radiologique de « Tchernobyl » avait été dix fois plus important en Alsace qu'en Bretagne. Le fond de cette information n'est pas inexact mais sa formulation correspond mieux à la vision d'un opposant au « nucléaire » qu'à celle d'un non opposant qui aurait plutôt dit l'inverse, c'est-à-dire que l'impact a été dix fois plus faible en Bretagne qu'en Alsace, où les niveaux étaient déjà de toutes façons inférieurs aux niveaux naturels et, de plus, conformes aux effets de « trajectoire » et d'« éloignement ». Le même raisonnement pourrait d'ailleurs s'appliquer à d'autres régions qui ont aussi défrayé la chronique comme la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse.

Lorsque l'accident de Tchernobyl est intervenu, on disposait déjà depuis quelques dizaines d'années de moyens de calculs prévisionnels non négligeables des conséquences radiologiques et sanitaires pour de tels événements. Ces moyens avaient pu être calés sur des situations réelles, comme celles de l'accident de Windscale en octobre 1957 ou des essais nucléaires atmosphériques dans les années 60 et 70. Moyennant quelques hypothèses simplificatrices mais systématiquement majorantes (plus courte distance, trajectoire unique), ces calculs étaient déjà de nature à fournir des informations sûres et très utiles dans les premiers instants concernant, entre autres, les régions hors d'atteinte en raison soit de leur éloi-

gnement soit de l'absence de trajectoire suffisamment proche. En matière de calcul de transferts dans l'environnement, l'accident de Tchernobyl a plutôt été une source de confirmations qu'une source de révélations.

Les premiers problèmes à résoudre se situant essentiellement dans l'atmosphère et à l'interface sol-atmosphère, la modélisation des phénomènes doit prendre en considération simultanément les cinq catégories essentielles de processus qui sont : l'advection, la diffusion turbulente, les dépôts secs, les dépôts par les précipitations et les remises en suspension. Les produits contaminants se présentent généralement sous une forme finement divisée, gaz ou aérosols, que l'on peut considérer comme passifs dans les masses d'air et dont les émissions sont traitées comme des séquences de bouffées instantanées qui restent soumises aux lois de ces masses d'air.

L'advection ou transport moyen

Lorsqu'il arrive que des masses d'air soient contaminées ou porteuses d'un polluant passif, le premier impératif est de maîtriser leur navigation ultérieure. Comme il est impossible de suivre individuellement chaque molécule, on introduit la notion d'échelle qui consiste à considérer, dans les masses d'air, des éléments que les météorologistes appellent « particules » ou « bouffées », et dont les dimensions (beaucoup plus grandes) correspondent mieux à l'échelle du problème à traiter et les rendent plus maniables. Ces dimensions sont couramment de l'ordre de 100, 30 et 3 km horizontalement et de quelques centaines de mètres verticalement. Elles peuvent même être beaucoup plus petites à proximité des sources et des exutoires. A l'intérieur de telles particules ou bouffées, on renonce à la connaissance d'une description détaillée que l'on remplace par une paramétrisation. Dans le cas de la décomposition des émissions de pollution en séquences de bouffées, on peut considérer soit une *concentration moyenne uniforme* dans toute la bouffée, soit une *concentration maximale* en son centre. Dans les deux cas, on peut appeler « trajectoire » le lieu, dans l'espace et dans le temps, du centre d'une particule ou d'une bouffée identifiée, auquel correspond une valeur moyenne ou maximale de concentration de polluant. Le processus

de transport moyen d'une particule d'air identifiable, et identifiée comme éventuellement polluée, sur une trajectoire, est couramment dénommé *advection*. Ce processus est traité par les méthodes et moyens de la météorologie.

La diffusion turbulente

Toujours avec la notion d'échelle, les mouvements de l'atmosphère peuvent être décomposés en mouvements moyens et mouvements turbulents. Les mouvements moyens constituant l'advection, les mouvements turbulents d'échelle inférieure, paramétrisés dans les particules ou bouffées, sont responsables d'une expansion de la pollution et, par conséquent, d'une diminution de sa concentration par dilution dans une masse d'air plus importante. Les paramètres de diffusion les plus utilisés sont soit des moments cinétiques turbulents ou diffusivités, soit des écarts-types de distributions normales du polluant. Les taux de déconcentration sont de l'ordre du temps à la puissance 3 jusqu'à une dizaine de jours et légèrement inférieurs après dix jours.

Les dépôts secs

Même en l'absence de précipitations, les masses d'air contaminées perdent, au cours de leur déplacement, une certaine proportion de leur contamination qui se dépose sur les différentes surfaces avec lesquelles elles sont en contact. Il s'agit d'un *dépôt turbulent*, et non gravitaire, auquel peut s'ajouter, à proximité de la source, un dépôt gravitaire classique des particules les plus lourdes. Le coefficient principal qui gouverne ce processus a la dimension d'une vitesse. C'est une vitesse de dépôt turbulent qui remplace une vitesse de chute ordinaire et qui s'applique aux concentrations volumiques en contact avec les surfaces pour obtenir des intensités d'accroissement de concentrations surfaciques. Son ordre de grandeur opérationnel se situe entre 0,001 et 0,1 m/s. Le dépôt laisse sur le sol une trace quasi permanente qui, à long terme et sans évacuation, constitue la principale cause des doses d'irradiation délivrées et subies, et peut même fournir, avec des radionucléides à vie longue tels que le césium 137, un ordre de grandeur légèrement par défaut de la somme des doses d'irradiations de toutes

natures. En contrepartie de circonstances défavorables, le dépôt présente un avantage fondamental. Il appauvrit les nuages de radioactivité et diminue d'autant les dépôts ultérieurs. Les études effectuées sur les retombées de l'accident de Tchernobyl ont permis de préciser que cet *effet d'appauvrissement*, pratiquement négligeable sur les premières centaines de kilomètres de transfert, devient, et de loin, la principale cause d'affaiblissement des doses au-delà du premier millier de kilomètres.

Les dépôts précipités

La différence essentielle entre les processus de dépôts « secs » et « précipités » est que, dans le premier cas, le prélèvement de matière dans les nuages ne commence que par la base, au contact de la surface alors que, dans le second cas, une épaisseur de plusieurs milliers de mètres peut se trouver lavée par une précipitation, et une grande proportion de la matière rencontrée précipitée en surface où elle constitue un dépôt précipité, appelé quelquefois (et improprement) *dépôt humide*. Comme dans le cas du dépôt sec, le coefficient qui gouverne le processus de dépôt précipité a la dimension d'une vitesse qu'il s'agit d'appliquer à des concentrations volumiques pour obtenir des intensités d'augmentation de concentrations surfaciques. Cependant, dans le cas du dépôt précipité, il y a lieu d'effectuer des intégrales verticales dans les masses d'air lavées et le coefficient de dépôt précipité, produit (vitesse) d'une longueur par l'inverse d'un temps, est plus précisément le produit de l'épaisseur d'une masse d'air lavée par une constante de lavage. La valeur numérique de cette constante étant le plus souvent de l'ordre de 10^{-4} s^{-1} (constante de temps de 10 000 s) et les épaisseurs lavées de l'ordre de 1 000 m, il s'ensuit que la vitesse de dépôt précipité est de l'ordre de 0,1 m/s, soit dix fois la valeur la plus courante de la vitesse de dépôt sec. Cette circonstance, associée au caractère sporadique connu des précipitations, est une explication des points chauds et du caractère dispersé (quelquefois appelé en « peau de léopard ») observés dans les retombées de Tchernobyl et assez analogues aux images « radar » des précipitations. L'appauvrissement dû au lavage des masses d'air radioactives par les précipitations est donc naturellement de l'ordre

de dix fois plus important que par le dépôt sec mais, au-delà du millier de kilomètres où l'appauvrissement est significatif, la fréquence des précipitations sur de longs délais étant de l'ordre de 10%, on retrouve approximativement, dans le cas du dépôt précipité, la même intensité d'appauvrissement que dans le cas du dépôt sec. En climat tempéré, les deux catégories de dépôt (sec et précipité) participent dans les mêmes proportions à la principale cause d'affaiblissement des doses au-delà du premier millier de kilomètres.

La remise en suspension

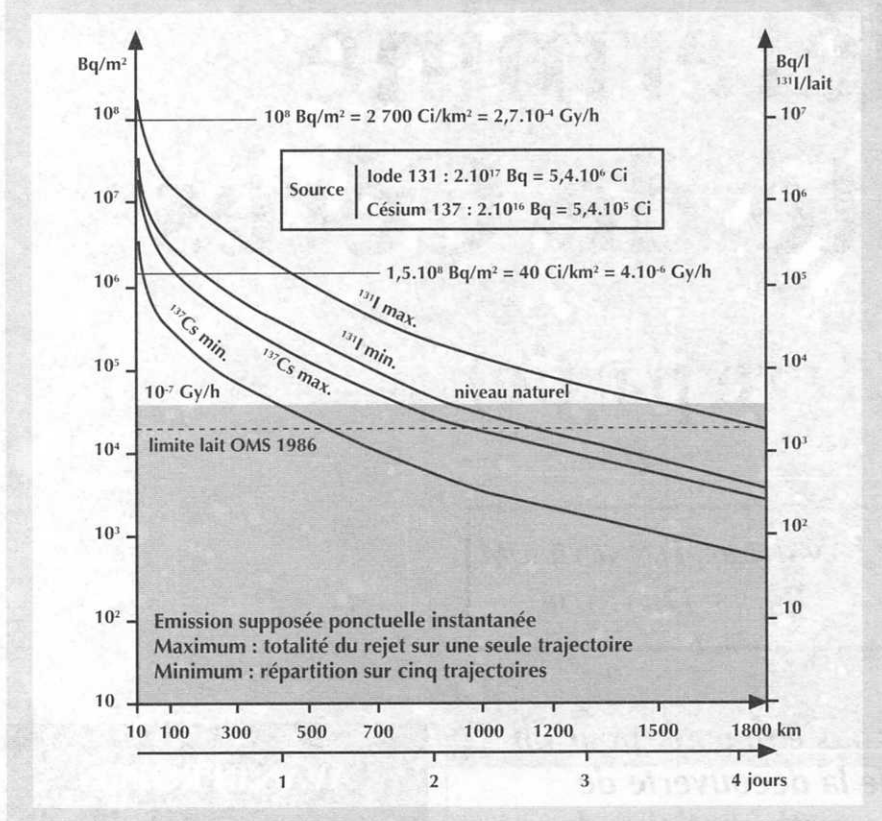
Les particules de matière qui ont pu être capturées par les différentes surfaces rencontrées et qui constituent les différents dépôts (secs et précipités) sont plus ou moins susceptibles d'être remises en suspension dans l'atmosphère par des mécanismes tels que les turbulences dynamiques ou thermiques, auxquelles peuvent se trouver associées des activités humaines. Cette remise en suspension peut être provisoire ou définitive et n'intéresse en général qu'une faible partie du dépôt qui n'a donc à subir aucune réévaluation. Elle peut intervenir assez longtemps, jusqu'à une année après le premier dépôt, avec un coefficient de la dimension de l'inverse d'une longueur, qui peut varier dans un très grand intervalle, de 10^{-4} m^{-1} à pratiquement zéro. La valeur opérationnelle maximale la plus courante de ce coefficient de remise en suspension dans les régions tempérées est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} m^{-1} pendant les cent premiers jours après le dépôt et décroît ensuite très rapidement. La remise en suspension n'est pas le principal processus des transferts dans l'environnement. Elle peut toutefois être la seule responsable de très faibles concentrations volumiques à très long terme.

Quelques données pour l'« après Tchernobyl »

Il est bien connu que l'on peut obtenir rapidement une bonne approximation, bien que légèrement par défaut, des doses délivrées en se limitant aux dépôts sur le sol de deux produits essentiels qui sont :

- l'iode 131, de période 8,05 jours

**Figure 1 - Tchernobyl :
impact en fonction de l'éloignement**



pour les effets à court terme ;

- le césium 137, de période 30 ans pour les effets à long terme.

Compte tenu d'un fonctionnement pendant un an du réacteur accidenté ainsi que des pourcentages de production dans le réacteur et de relâchement dans l'environnement des différents produits, le « terme source Tchernobyl » comporte environ, après une heure de refroidissement :

- $1 \cdot 10^{20}$ Bq de tous produits de fission ;
- $2 \cdot 10^{17}$ Bq d'iode 131 ;
- $2 \cdot 10^{16}$ Bq de césium 137.

Avec ces valeurs d'émission et les instruments de modélisation précédemment évoqués et assez peu contestés, on peut obtenir des courbes de dépôts surfaciques en becquerels par mètre carré en fonction du temps écoulé et de la distance parcourue, comme les quatre courbes représentées sur la **figure 1**. Deux de ces courbes sont relatives à l'iode 131 (maximum et minimum), les deux autres au césium 137 (maximum et minimum). Dans chacun des deux cas, la courbe du maximum donne des valeurs certainement par excès

pour deux raisons principales : d'une part, une hypothèse peu vraisemblable d'émission unique quasi instantanée de la totalité des rejets et, d'autre part, une hypothèse tout aussi invraisemblable de trajectoire unique. Les courbes de minimum, quant à elles, donnent des valeurs plus réalistes grâce à une hypothèse de navigation répartie sur cinq trajectoires différentes, mais il ne faut pas perdre de vue que certaines régions et certains points peuvent se trouver complètement épargnés par suite de l'absence de passage d'aucune trajectoire suffisamment proche. En cas de pluie coïncidant avec le passage d'une masse d'air contaminée, il faut s'attendre en outre à une majoration locale supplémentaire d'un facteur de l'ordre de 10, susceptible de déterminer cet aspect en « peau de léopard » de la retombée observée, comparable à l'aspect de dispersion bien connu des échos « radar » des précipitations. Tous les résultats calculés ont pu être corroborés par de nombreuses mesures effectuées et publiées par de nombreux laboratoires de différents pays.

Sur la **figure 1**, on peut égale-

ment lire :

- le niveau de dépôt d'un émetteur γ de 0,7 MeV créant à 1 m au-dessus de ce dépôt un débit de dose de 10^{-7} Gy/h, soit un débit naturel moyen en Europe ;

- la concentration correspondante d'iode 131 dans le lait à raison de 0,1 Bq/l pour 1 Bq/m² ;

- le seuil de 2 000 Bq/l de lait défini par les autorités compétentes de onze pays de l'Ouest et de l'Est réunis le 6 mai 1986 à Copenhague par l'Organisation mondiale de la santé, seuil en dessous duquel aucune mesure de protection sanitaire n'est nécessaire, s'agissant d'une pointe passagère.

L'information essentielle qui est mise en évidence par la **figure 1** est que, même dans le pire des cas, les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl sont nulles au-delà d'une distance de 1 500 à 1 800 km du lieu de l'accident à vol d'oiseau, et notamment en France en toutes régions, étant rappelé que les distances réelles entre deux points sont, de plus, toujours plus grandes que les distances à vol d'oiseau.

Conclusion générale

La notion de « nuage de Tchernobyl » est aberrante car il s'agit en fait de masses d'air contaminées par des rejets variables pendant dix jours et qui ont progressivement intéressé toute la planète avec des concentrations en baisse continue jusqu'à des valeurs quasi nulles. Leurs trajectoires ont effectivement assez peu intéressé la France où aucune mesure sanitaire n'a jamais été justifiée. Compte tenu notamment des difficultés d'interprétation des études épidémiologiques à caractère statistique, il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que certaines conclusions utiles et sûres peuvent être obtenues rapidement par des calculs physiques et radiologiques simples à partir des rejets dans l'environnement. De cette manière, on peut étayer les évaluations de conséquences sanitaires en aval et éviter des situations fâcheuses ou des déclarations contradictoires comme le cas s'est produit fin mars 1996, à propos d'une fausse augmentation du nombre de cancers de la thyroïde chez des enfants de la région PACA-Corse. ■