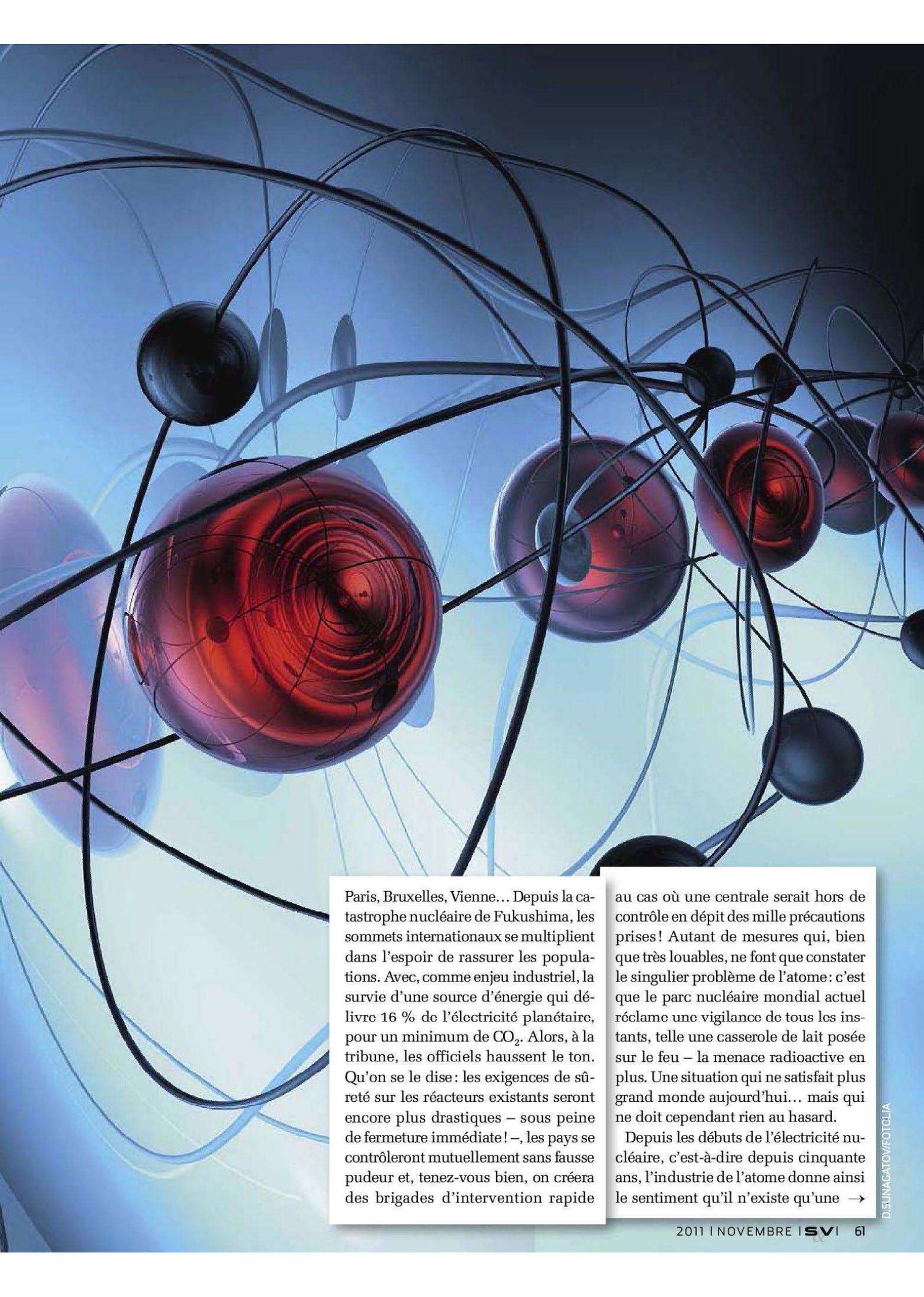


*Plus sûr, plus propre,  
et pourtant ignoré depuis 50 ans*

# LE NUCLÉAIRE SANS URANIUM

*C'est un secret bien gardé : il existe une autre manière de produire de l'électricité nucléaire que celle mise en place depuis 50 ans ! En particulier, des réacteurs dits "à sels fondus", à base de thorium plutôt que d'uranium, feraient aussi bien, mais sans risquer de provoquer des Tchernobyl ou des Fukushima ! La solution rêvée pour l'avenir ? Encore faudrait-il que la filière revoit ses dogmes. Explications.*

PAR VINCENT NOUYRICAT



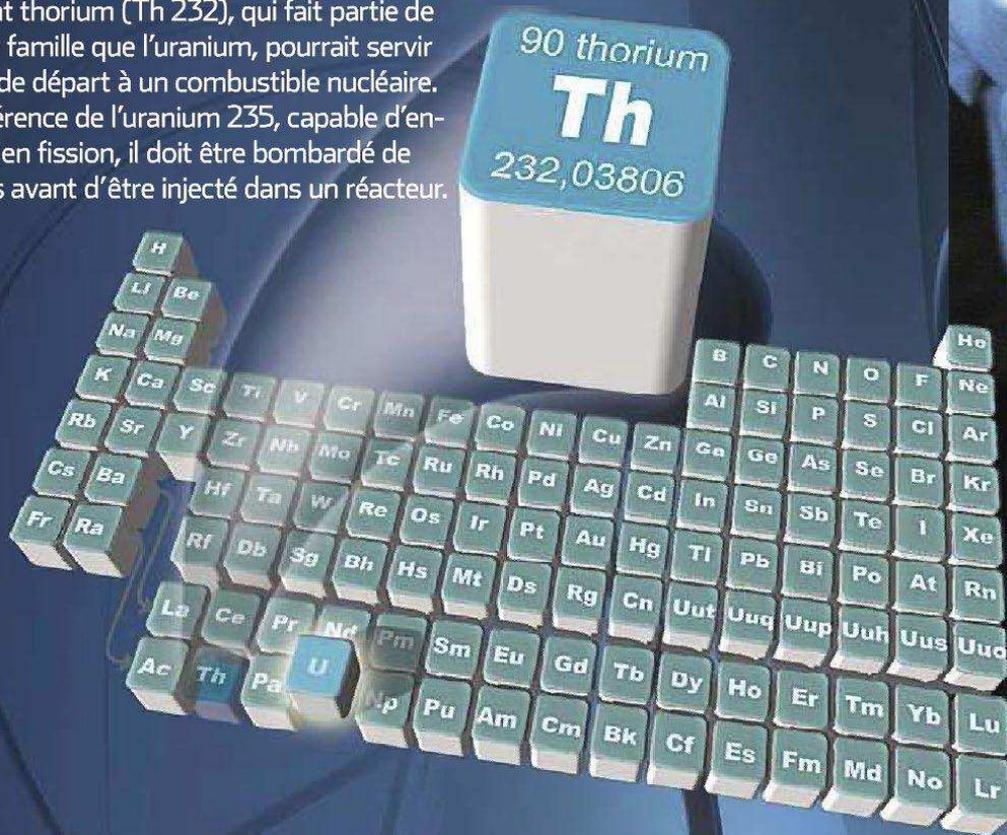
Paris, Bruxelles, Vienne... Depuis la catastrophe nucléaire de Fukushima, les sommets internationaux se multiplient dans l'espoir de rassurer les populations. Avec, comme enjeu industriel, la survie d'une source d'énergie qui délivre 16 % de l'électricité planétaire, pour un minimum de CO<sub>2</sub>. Alors, à la tribune, les officiels haussent le ton. Qu'on se le dise : les exigences de sûreté sur les réacteurs existants seront encore plus drastiques – sous peine de fermeture immédiate! –, les pays se contrôleront mutuellement sans fausse pudeur et, tenez-vous bien, on créera des brigades d'intervention rapide

au cas où une centrale serait hors de contrôle en dépit des mille précautions prises! Autant de mesures qui, bien que très louables, ne font que constater le singulier problème de l'atome : c'est que le parc nucléaire mondial actuel réclame une vigilance de tous les instants, telle une casserole de lait posée sur le feu – la menace radioactive en plus. Une situation qui ne satisfait plus grand monde aujourd'hui... mais qui ne doit cependant rien au hasard.

Depuis les débuts de l'électricité nucléaire, c'est-à-dire depuis cinquante ans, l'industrie de l'atome donne ainsi le sentiment qu'il n'existe qu'une →

## Du thorium à la place de l'uranium

L'élément thorium (Th 232), qui fait partie de la même famille que l'uranium, pourrait servir de base de départ à un combustible nucléaire. A la différence de l'uranium 235, capable d'entrer seul en fission, il doit être bombardé de neutrons avant d'être injecté dans un réacteur.



→ seule et unique manière d'exploiter la fission. Au point que, pour tout le monde, la recette de l'électricité nucléaire ne souffre *a priori* aucune discussion. Prenez de l'uranium (teneur de 3 à 5 % en isotope fissile  $^{235}\text{U}$ ) et confectionnez de longs crayons rigides; plongez ces crayons en rangs serrés dans une marmite; remplissez la marmite d'eau et maintenez le tout sous 155 bars de pression afin d'éviter l'ébullition; laissez les fragiles et instables atomes d'uranium se bombarder mutuellement de neutrons, de telle sorte qu'ils se fragmentent en libérant à la fois de nouveaux neutrons (gages de réactions en chaîne) et une chaleur intense; récupérez cette chaleur évacuée par l'eau pressurisée, et vous produirez de la vapeur, puis de l'électricité, *via* un classique réacteur refroidi à l'eau sous pression, omniprésent en France. (Il existe d'autres types de réacteurs, mais ce ne sont que des déclinaisons fonctionnant peu ou prou selon ces principes.) Mais voilà, cette recette a beau être servie depuis des

lustres à la table du nucléaire, elle est particulièrement restrictive et bornée! Surtout, elle n'est pas la seule capable de produire de l'électricité nucléaire: il existe d'autres recettes pour déclencher une réaction de fission nucléaire et maintenir cette réaction tout en la contrôlant! On pourrait ainsi prendre, à la place de l'uranium, du minerai de thorium (voir ci-dessus); transformer ce combustible en liquide plutôt qu'en crayons solides; mélanger le tout dans

### UNE RECETTE QUI, A PRIORI, REMÉDIE À TOUS LES ENNUIS QUE CONNAÎT LE NUCLÉAIRE

un fluide de refroidissement qui serait ici un sirop de sels fondus à pression ambiante, et non de l'eau sous haute pression (voir l'infographie p. 65).

Soit un "réacteur alimenté au thorium et refroidi aux sels fondus"... dont personne n'a jamais vu la couleur dans le paysage industriel. Alors que ce réacteur est parfaitement envisagé

par une poignée de scientifiques, dont de prestigieux pionniers de la fission, qui n'ont jamais cessé d'être habités par cette question vertigineuse: et si, au lieu des centrales actuelles, il nous avait été donné de développer d'autres genres de réacteurs, intrinsèquement sûrs et dociles? Car il se trouve que cette géniale combinaison thorium/sels fondus remédierait, *a priori*, à tous les inconvénients du nucléaire que nous déplorons aujourd'hui! Charles

Forsberg, chercheur au département nucléaire du MIT, ne cache pas son admiration: "Grâce à ses remarquables qualités naturelles de sûreté, un

tel réacteur se serait autrement mieux comporté à Fukushima... du moins sur le papier!" Le gouvernement chinois ne s'y est pas trompé: le 25 janvier dernier, l'Académie des sciences de Shanghai a lancé un vaste programme de 250 millions de dollars sur ce concept. Tandis que, depuis la catastrophe de Fukushima, les conférences sur ce



< Dissous dans des sels fondus, ces morceaux de thorium peuvent servir de combustible à un réacteur... remplaçant ainsi l'uranium.



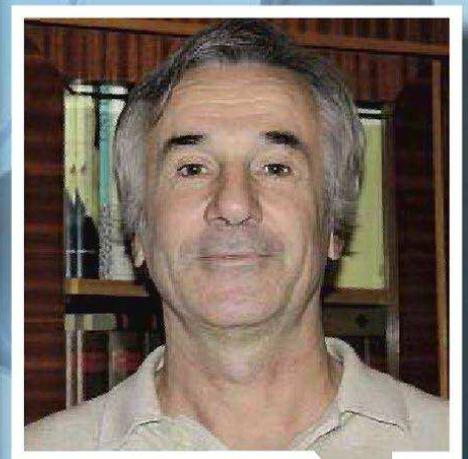
^ Le thorium est extrait de ce minéral (la thorite), dont les réserves terrestres (Inde, Australie, Norvège, États-Unis, Brésil...) sont bien mieux réparties que celles d'uranium.

thème se multiplient. Des groupes de pression, comme la Thorium Energy Alliance, se sont même formés outre-Atlantique. Et l'engouement commence aussi à gagner le grand public via Internet – il se vend des tee-shirts à la gloire du thorium !

### REVOIR LE PRINCIPE DES RÉACTEURS

Aussi surprenant que cela puisse sembler, un autre nucléaire est donc possible. Et cette alternative, en plus d'être possible, apparaît également souhaitable. Souvenez-vous: la fusion du réacteur n° 2 de Three Mile Island, aux États-Unis, en 1979; l'explosion du réacteur n° 4 de Tchernobyl, en ex-URSS, en 1986; et, plus récemment, la perte des réacteurs n° 1, 2 et 3 de Fukushima, au Japon... Au cours des trois dernières décennies, plus de 1 % des réacteurs en activité dans le monde ont connu l'équivalent d'un crash! Les statistiques commencent à devenir inquiétantes. Certes, les circonstances de ces accidents ne sont pas les mêmes, et les technologies en cause diffèrent

aussi – à Tchernobyl, il s'agissait d'un réacteur à graphite version soviétique, alors que les deux autres cas concernent la famille des réacteurs à eau "occidentaux". Mais, au bout du compte, s'inquiète Jacques Repussard, directeur de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), "le nucléaire montre là un niveau de risque inacceptable, guère meilleur que celui rencontré dans l'industrie chimique! C'est inacceptable dans le cas de l'atome, car il existe dans nos sociétés une aversion très particulière pour l'accident radiologique, qu'importe le faible nombre de victimes." Outre l'acceptation par les populations, entrent aussi en jeu →



**VICTOR IGNATIEV**

PHYSICIEN À L'INSTITUT KURCHATOV (MOSCOU)

*Le réacteur à sels fondus au thorium coche toutes les cases de garanties de sûreté*

→ des conséquences économiques pour les pays touchés par un accident. Une chose est sûre, poursuit ce haut responsable, *“si elle veut continuer à exister et à se développer, l'énergie nucléaire ne peut pas en rester là”*.

Toute la question est de savoir comment progresser... Clamer haut et fort que *“la filière tirera les enseignements de l'accident de Fukushima”* ne constitue pas un gage suffisant. D'après Giovanni Bruna, expert en sûreté nucléaire à l'IRSN, *“les leçons tirées de Three Mile Island et de Tchernobyl, où se mêlaient erreurs humaines et défaillances matérielles, n'ont pas servi à Fukushima qui a été victime d'une combinaison aussi sidérante qu'imprévisible d'aléas naturels. Le prochain accident devrait suivre des scénarios que nous n'aurons pas anticipés : il va falloir imaginer l'inimaginable.”* Imaginer l'inimaginable? Vaste programme... *“Cela dépasse l'entendement et ne se réglera pas seulement en surélevant la hauteur des digues de protection, tranche Jacques Repussard. Des progrès en sécurité ne s'accompliront qu'en s'attaquant au vrai sujet : les caractéristiques fondamentales des réacteurs.”* Un sujet que les discours officiels n'abordent jamais...

### DES IDÉES LAISSÉES SUR LA TOUCHE

Et pour cause, les usines à fission en service aujourd'hui cachent en leur sein un lourd secret. Un secret historique, originel même : leur technologie n'a pas été sélectionnée au départ sur des critères de sûreté! En clair, celle-ci n'a pas été choisie parce qu'elle était la plus sûre – ni d'ailleurs la plus efficace ou la plus sobre en déchets. C'est qu'à l'époque, d'autres nécessités impérieuses présidaient (lire la suite du dossier pp. 72-73). On comprend alors mieux la multitude de défauts de sûreté qui frappent nos réacteurs à eau sous pression : la très haute pression régnant dans les circuits, la monstrueuse concentration de matière réactive dans

la cuve, le délicat refroidissement du cœur, la fragilité des barres de combustible et de leurs gaines, etc. Or, cette longue liste n'est en aucun cas une fatalité de la fission nucléaire, pas plus que le signe d'un manque de solutions alternatives. Bien au contraire, les pionniers des laboratoires d'Oak Ridge (Tennessee, Etats-Unis), sacro-saint foyer de l'énergie nucléaire, avaient plutôt l'embarras du choix. En effet, peu après les premières expériences de fission (en 1942), se bousculaient déjà dans leur tête un millier d'architectures possibles de réacteurs, réalisables en combinant les différents combustibles, fluides de refroidissement et modérateurs (matériaux qui facilitent la réaction de fission).

## FUKUSHIMA L'A PROUVÉ : TIRER LES LEÇONS DES ACCIDENTS NE SUFFIT PAS

L'occasion a encore été donnée de le vérifier au début des années 2000, lorsque les Etats-Unis ont proposé de plancher sur une nouvelle génération de réacteurs, la quatrième. Il s'agissait à l'époque, dans une perspective d'envolée mondiale du nucléaire (c'était avant Fukushima...), d'éliminer deux défauts gênants : la voracité en uranium des centrales existantes ainsi que leur production d'infâmes déchets radioactifs. Franck Carré, directeur scientifique pour l'énergie nucléaire au CEA, a participé à la définition de cette “génération 4” : *“Nous avons analysé pas moins de 120 concepts explorés par le passé! Les ingénieurs ne sont pas à court d'imagination pour trouver de nouvelles architectures, et cette science est encore jeune.”* Si les réacteurs actuels sont loin d'être le plus mauvais choix possible, les chercheurs ne sont pas non plus à l'abri de tomber sur une pépite. Au final, six prétendants (voir quatre d'entre eux p. 71) ont été sélectionnés en vue de représenter cette génération 4. Et parmi eux se trouve justement le réacteur au thorium →

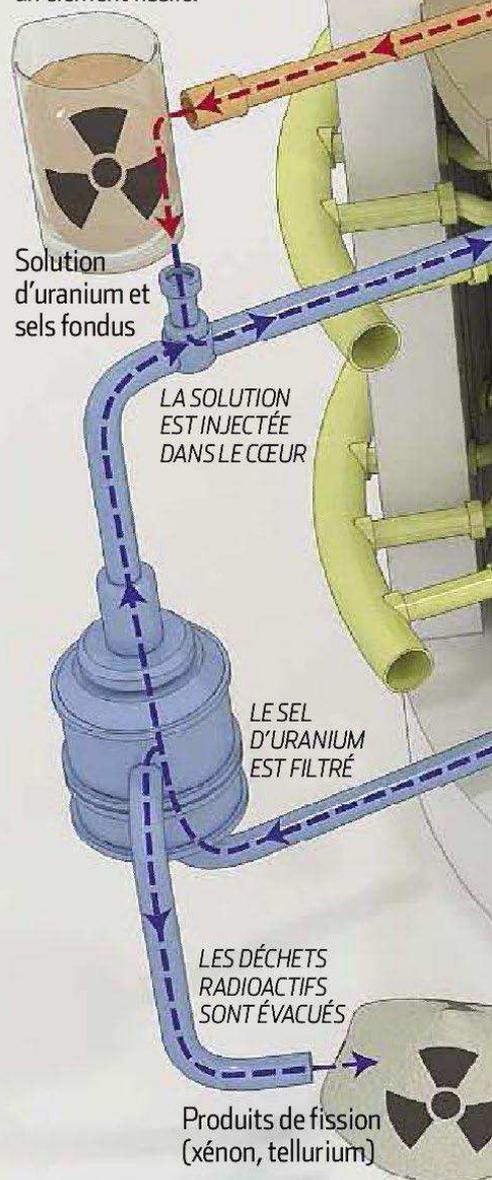
### 1 Du thorium est extrait

Le minerai de thorium est dissous dans des sels fondus et introduit dans un circuit entourant la cuve du réacteur : la “couverture fertile”.



### 2 Il est transformé en uranium fissile

Le thorium, bombardé par les neutrons qu'émet le réacteur nucléaire, se transforme en uranium 233, un élément fissile.



# Les secrets du réacteur à sels fondus

## 3 Le combustible est injecté

La solution de sels fondus et d'uranium 233 est injectée dans la cuve du réacteur.

Rien à voir avec les centrales actuelles : la matière première est ici du thorium, et non de l'uranium ; le combustible est liquide, et non solide ; et le refroidissement est assuré par un sirop de sels fondus, et non par de l'eau sous pression.

## 4 Le combustible entre en fission

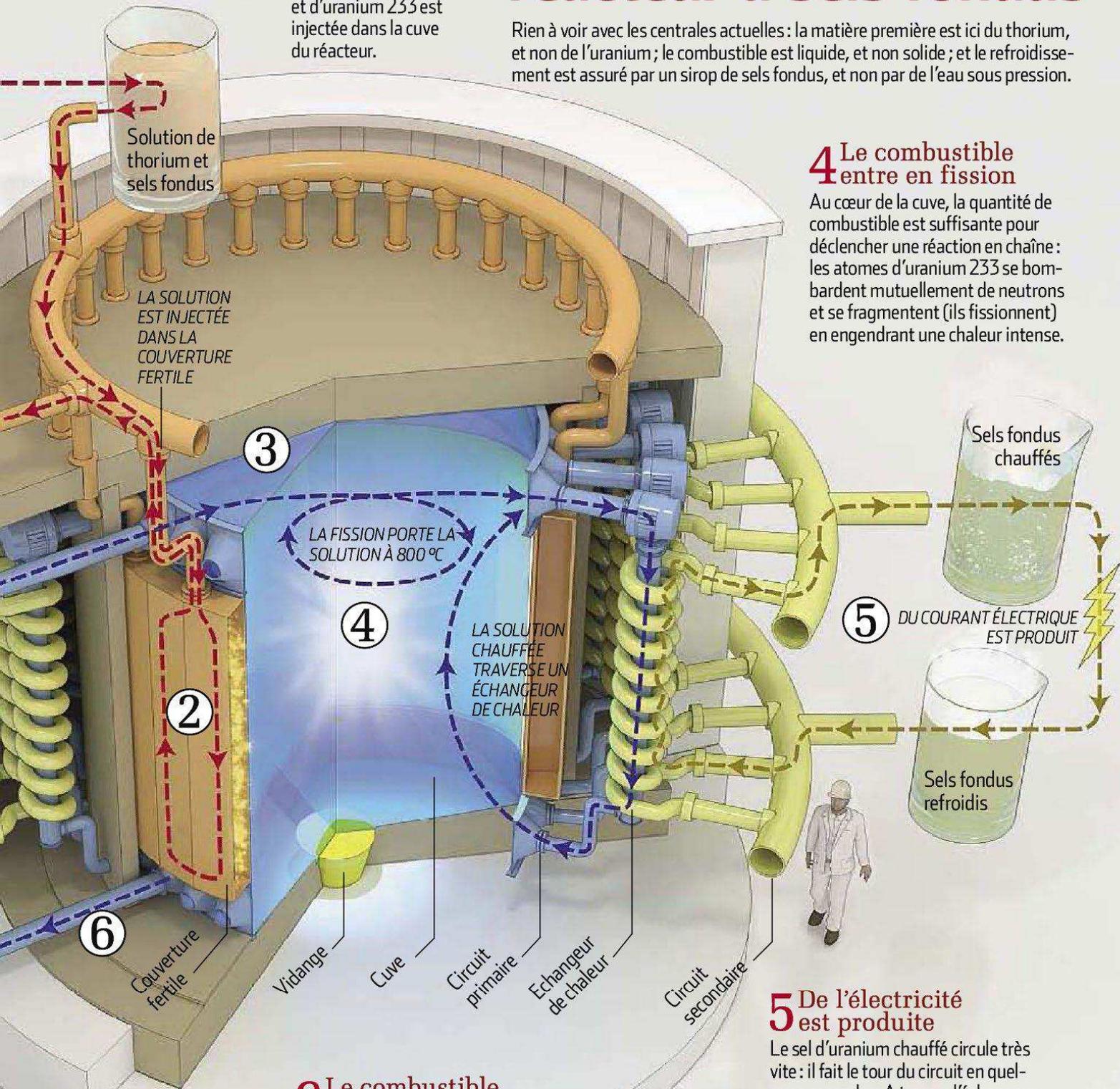
Au cœur de la cuve, la quantité de combustible est suffisante pour déclencher une réaction en chaîne : les atomes d'uranium 233 se bombardent mutuellement de neutrons et se fragmentent (ils fissionnent) en engendrant une chaleur intense.

## 5 De l'électricité est produite

Le sel d'uranium chauffé circule très vite : il fait le tour du circuit en quelques secondes. A travers l'échangeur de chaleur, le circuit secondaire récupère l'énergie et s'échauffe à son tour. Le circuit secondaire transmet sa chaleur à une turbine à vapeur qui sert à produire du courant.

## 6 Le combustible est nettoyé et recyclé

La solution est régulièrement filtrée. Les produits de fission, qui ralentissent le réacteur, sont extraits. Le sel d'uranium est, quant à lui, réintroduit dans la cuve.



Solution de thorium et sels fondus

LA SOLUTION EST INJECTÉE DANS LA COUVERTURE FERTILE

3

LA FISSION PORTE LA SOLUTION À 800 °C

4

LA SOLUTION CHAUFFÉE TRAVERSE UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR

5

DU COURANT ÉLECTRIQUE EST PRODUIT

Sels fondus refroidis

Sels fondus chauffés

6

Couverture fertile

Vidange

Cuve

Circuit primaire

Echangeur de chaleur

Circuit secondaire

→ à sels fondus, LA fameuse pépite, le rêve secret que font la nuit les ingénieurs nucléaires.

L'enthousiasme pour cette architecture a des racines singulièrement profondes et solides. De fait, la révélation de cette petite merveille de machine s'est opérée à la fin des années 1950 dans les prestigieux laboratoires d'Oak Ridge... A l'heure où les grands industriels commençaient à vendre les premiers exemplaires de nos réacteurs très imparfaits, les plus brillants cerveaux de la fission militaient, eux, pour ces machines à sels fondus et au thorium. Quelques électriciens, dont le français EDF, ont aussi flirté avec l'idée pendant un temps. S'en étaient suivies cinquante années de velléités et de belles intentions entretenues par une poignée de laboratoires dans le monde, y compris en France. Une vie de bohème qui pourrait bien prendre fin grâce

à l'émoi suscité par Fukushima... Au premier abord, la simple vision d'un combustible fissile liquide circulant dans les entrailles d'un réacteur peut sembler parfaitement fantaisiste. Pourtant, cette voie a très tôt enthousiasmé, dès 1944, les héros de la fission. Plus édifiant encore : Alvin Weinberg, l'un des découvreurs des actuels réacteurs à eau sous pression, consacra la quasi-totalité de sa carrière à défendre cette idée de particules de combustible dissoutes dans des sels fondus.

### "LE RÊVE DE TOUT NEUTRONICIEN"

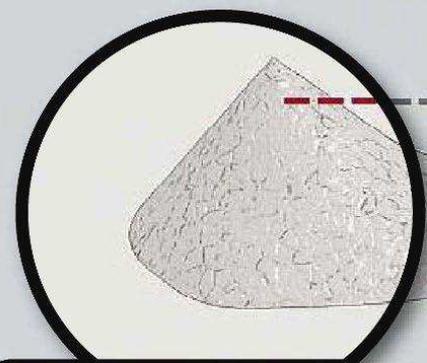
Pourquoi une telle insistance ? Parce que c'est sans doute la meilleure manière de faire du nucléaire... Avec un tel réacteur, les ingénieurs auraient pu s'épargner nombre de casse-tête en matière de sûreté qui les mobilisent encore par milliers. Ainsi, s'enthousiasme Elsa Merle-Lucotte, du Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC) de Grenoble, "ce dispositif permet d'adapter sans cesse la quantité de combustible présent dans le circuit, alors que le cœur

de nos réacteurs actuels doit contenir dès le départ une énorme réserve de réactivité... ce qui n'est pas sans risques !" Ajoutez à cela, poursuit la physicienne, que "ce liquide est insensible aux radiations intenses, au contraire de nos barres de combustible qui se fragilisent dangereusement et doivent être souvent remplacées". Ce ne sont là que deux exemples dans une liste qui comprend de nombreux autres avantages (voir l'infographie ci-contre). Dès lors, on comprend que ce dispositif autorise toutes les audaces et dissipe en même temps les plus grandes craintes. "Le réacteur à sels fondus au thorium coche toutes les cases de garanties de sûreté", estime Victor Ignatiev, physicien à l'Institut Kurchatov (Moscou).

## DÈS 1962, UN RAPPORT PARLAIT DE LA SOLUTION D'AVENIR PAR EXCELLENCE

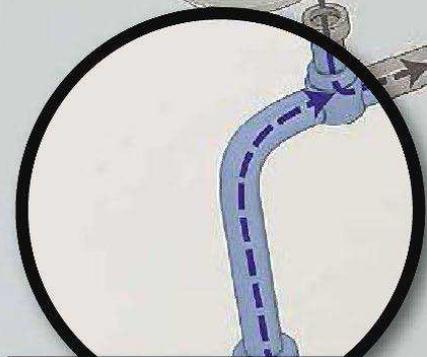
L'histoire du nucléaire en aurait sûrement été changée (lire p. 68-69)...

"Ce concept est le rêve de tout neutronicien", reconnaît bien volontiers Giovanni Bruna, le directeur adjoint à la sûreté des réacteurs de l'IRSN. Un rêve qui s'est déjà concrétisé ! Les chercheurs d'Oak Ridge ont en effet mis au point par le passé deux (petits) prototypes à sels fondus. Le premier a été élaboré à l'occasion d'un projet militaire assez improbable, défendu par l'US Air Force : il s'agissait alors de faire carburer les bombardiers stratégiques à l'énergie nucléaire. Le 3 novembre 1954, un candidat à sels fondus démarre au sol. Cette première expérience ne fonctionne en tout et pour tout que cent heures, mais cela suffit à convaincre les chercheurs. Alors qu'Oak Ridge croule sous les requêtes les plus diverses, le combustible liquide reste dans toutes les têtes. Un rapport remis en 1962 au président Kennedy n'hésite pas à le présenter comme la solution d'avenir par excellence. Trois ans plus tard, en juin 1965, un deuxième prototype plus abouti →



### 7 Les ressources de thorium sont immenses

Très abondant, le minerai de thorium est entièrement utilisable, alors que l'isotope fissile uranium 235 de nos réacteurs représente seulement 0,7 % de l'uranium extrait dans les mines ! La haute température de fonctionnement du réacteur au thorium lui assure par ailleurs un rendement de 40 %, contre 33 % pour les unités actuelles.



### 7 Les menaces de prolifération sont réduites

Sous l'effet des neutrons, le thorium se transforme principalement en uranium 233, mais aussi en partie en uranium 232, qui émet des rayonnements gamma très pénétrants. La construction d'une bombe atomique reste donc possible, mais sa mise au point est ici bien plus délicate et dangereuse.

# 7 avantages qui changent tout

## 2 Le cœur ne pourra plus s'emballer

La quantité de combustible est ici ajustée au fur et à mesure. Le cœur des réacteurs classiques, lui, concentre près de 100 t de matière fissile : même si des précautions ont été prises pour éviter qu'un tel monstre ne s'emballer, la perte d'une des sécurités en un point du cœur fait peser la menace d'une soudaine accélération de la réaction en chaîne !

## 3 Les risques de dégradation ou d'explosion sont écartés

Les radiations n'ont aucun effet mécanique sur ce combustible liquide, alors que les crayons solides de combustible des réacteurs actuels se fragilisent sous l'effet du bombardement neutronique. Pis encore : en cas de perte soudaine du liquide de refroidissement, les gaines en zirconium entourant ces crayons produisent de grandes quantités d'hydrogène explosif !

## 4 Les problèmes de pression sont réglés

Le circuit à sels fondus marche à pression ambiante : une épine en moins ! Car les réacteurs actuels, à eau, fonctionnent sous une pression de 155 bars. Et dans ces conditions, la moindre brèche laisse s'échapper à grande vitesse le liquide de refroidissement et des produits radioactifs... De plus, cette pression se reporte sur l'enceinte entourant les réacteurs, au risque de la faire céder.

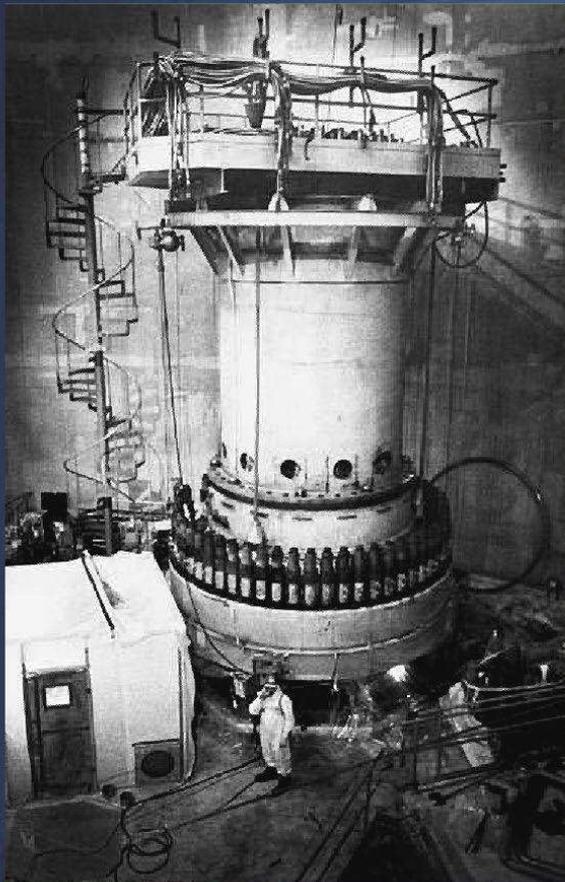
## 5 La question du refroidissement en cas de panne est résolue

En cas d'arrêt d'urgence, le combustible liquide est tout simplement vidangé par gravité dans 4 réservoirs assurant naturellement l'évacuation de la chaleur... C'est impossible dans les réacteurs actuels, dont les crayons d'uranium continuent d'émettre, une seconde après l'arrêt de la réaction en chaîne, 7 % de la puissance thermique initiale – de quoi faire bouillir 500 litres d'eau durant cette seconde. Si les pompes électriques de refroidissement tombent en panne, nos réacteurs actuels entrent alors en fusion.

## 6 La quantité de déchets à vie longue est 10 000 fois moindre

Lors de la fission, le thorium produit jusqu'à 10 000 fois moins d'éléments "transuraniens", ces déchets dangereux pour une centaine de milliers d'années qui sont l'inéluctable fardeau des réacteurs classiques. Qui plus est, le caractère "surgénérateur" de ce réacteur au thorium permet de réutiliser en partie ces déchets.

## Risque nucléaire Avec un réacteur au thorium...



### ... le réacteur n° 2 de Three Mile Island n'aurait pas fondu

Le 28 mars 1979, à la centrale de Three Mile Island (Pennsylvanie), le combustible du réacteur n° 2 entre en fusion à la suite de la perte du liquide de refroidissement... ce qui aurait été impossible avec un réacteur à sels fondus. Et pour cause : dans ce type de réacteur, le combustible se présente sous forme liquide – d'une certaine façon, il a déjà fondu. Et le combustible est dissous au sein même de son liquide de refroidissement (les sels fondus) : ce dernier ne peut donc pas faire défaut. Dans le pire des cas, le mélange combustible/sels fondus serait vidangé dans des bassins dont la géométrie facilite son refroidissement et interdit les réactions en chaîne. C'est l'intérêt d'un combustible liquide, qui peut être remodelé en fonction de la situation. Dès lors, personne n'aurait entendu parler de Three Mile Island...

→ démarre enfin. Le MSRE ("Molten-Salt Reactor Experiment") va tourner durant 13 000 heures en rencontrant très peu d'incidents, qui plus est mineurs, alors qu'il s'agit encore d'une technologie expérimentale. L'extraction des produits issus de la fission s'avère étonnamment facile. Bref, une réussite exemplaire. En décembre 1969, lorsque le prototype MSRE est arrêté, les petits génies d'Oak Ridge planchent déjà sur la prochaine étape : le dessin d'un véritable réacteur de 1 000 mégawatts.

Mais alors que la dynamique du succès paraît assurée, patatras ! la toute puissante Atomic Energy Commission (AEC) leur coupe soudain tout financement. Et ce, sans fournir le moindre motif technique valable ! Nous sommes en janvier 1973. Sous le choc, les chercheurs se perdent en conjectures. Le réacteur classique refroidi à l'eau,

cher à l'AEC, est-il à ce point indéboulonnable ? Ont-ils été victimes de la concurrence féroce des autres laboratoires qui, eux, planchent sur un réacteur refroidi au sodium (voir l'encadré Super Phénix p. 77) ? Ou sont-ils en train de payer le prix des relations exécrables qui règnent entre les dirigeants d'Oak Ridge et ceux de l'AEC ?

#### RENDEZ-VOUS RATÉ AVEC L'HISTOIRE

Il est vrai aussi que les préoccupations quant à la sûreté ou les déchets n'étaient pas encore à l'ordre du jour, et que l'uranium 235, seul isotope fissile disponible dans la nature, se trouvait alors en abondance... Toutefois, près de trente ans plus tard, la pilule a encore du mal à passer. Murray Rosenthal, en charge à l'époque du projet sels fondus à Oak Ridge, nous a confié son amertume : "A mon avis, l'AEC

*nous aurait laissé continuer notre programme si nous les avions laissés plus tranquilles. Or, nous n'avons jamais cessé de leur demander des budgets plus importants, ni de vanter en toute occasion les avantages manifestes des réacteurs à sels fondus. Par conséquent, nous étions une menace dans leur volonté indéniable de ne privilégier qu'un seul concept.*" Aussi grotesque que cela paraisse, l'avenir du nucléaire a tenu en partie à des problèmes de susceptibilité...

Pourtant, si le coup est rude, il n'est pas mortel. En effet, cette même année 1973, des chimistes du CEA, auxquels se joignent ensuite des chercheurs d'EDF, décident vaillamment de prolonger les travaux américains. Cette quarantaine de Français ne fait pas mystère que ce dispositif est "le rêve de tout concepteur, de toute autorité →

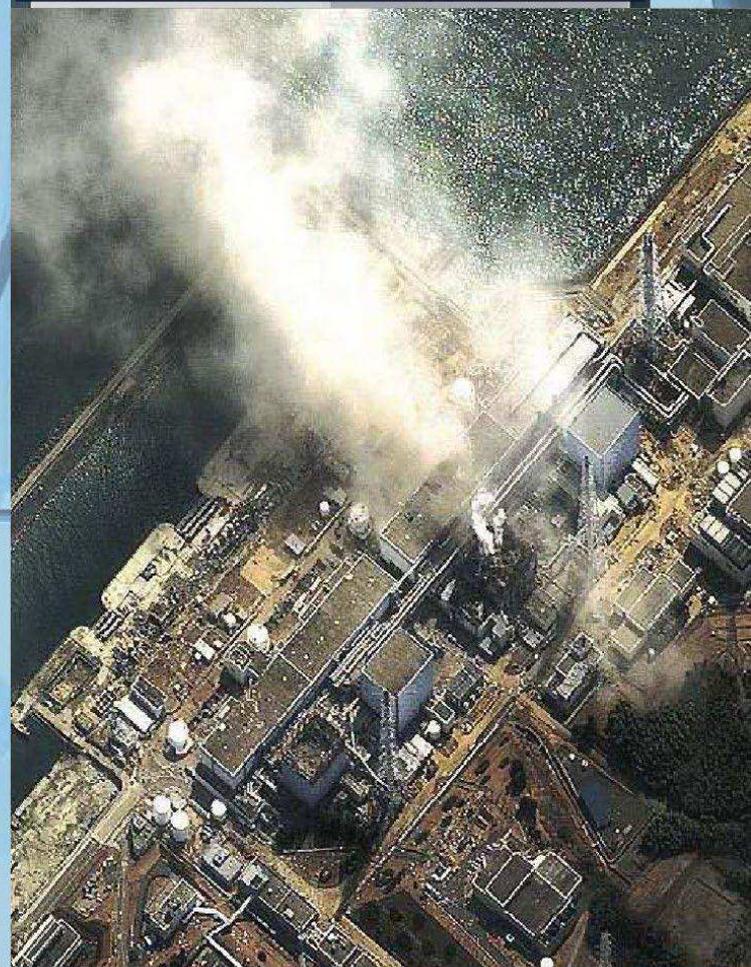


### **... la centrale de Fukushima ne serait pas devenue incontrôlable**

Le 11 mars 2011, à la centrale de Fukushima (Japon), la perte des alimentations électriques entraîne la fusion du combustible des réacteurs n° 1 puis 2 et 3, dont les enceintes explosent. Avec des réacteurs à sels fondus, la coupure brutale d'électricité n'aurait pas été un problème : maintenu à basse température par des systèmes électriques, un bouchon de sels fondus installé au bas du circuit se mettrait alors à fondre. Et le combustible liquide de s'écouler par gravité dans quatre bassins permettant son refroidissement naturel – facilité par l'élimination fréquente, au sein du liquide, des produits de fission producteurs de chaleur. Qui plus est, les enceintes auraient aussi été épargnées : les circuits évoluent ici à pression ambiante (et non à 155 bars), et il n'y a ni eau ni matériau susceptible de former de l'hydrogène explosif, au contraire des réacteurs actuels.

### **... le réacteur n° 4 de Tchernobyl n'aurait pas explosé**

Le 26 avril 1986, à la centrale de Tchernobyl (Ukraine), une erreur technique provoque la brutale accélération de la réaction en chaîne dans le réacteur n° 4 : transformé en Cocotte-Minute, son cœur vole en éclats et libère un gigantesque nuage radioactif. Un emballement catastrophique qui aurait été impossible avec un réacteur à sels fondus, pour la simple et bonne raison que son combustible liquide ne peut pas... s'emballer ! Car dès lors que la réaction en chaîne s'accélère, la température augmente et le fluide se dilate. Ce faisant, la densité des particules de combustible décroît et la fission ralentit d'elle-même. Outre cette stabilité naturelle, la formation d'un "nuage de Tchernobyl" n'aurait de toute façon guère été envisageable ici : les poisons radioactifs volatils formés lors de la fission sont régulièrement évacués du circuit principal au fil de l'écoulement.



→ de sûreté, de tout exploitant de centrale nucléaire”. Tout le monde y trouve son compte... Même si, après dix années d'études aussi poussées que convaincantes, l'idée est discrètement mise au placard; c'est que les réacteurs classiques accaparent désormais tout le monde. Il faut la ténacité de quelques laboratoires au Japon, en Russie, aux États-Unis, en République tchèque, et surtout en France, pour continuer de faire évoluer le concept... Les physiciens du CNRS, à Grenoble, viennent d'ailleurs tout récemment de tracer le dessin d'un réacteur de ce type (1 500 MW), le plus abouti et le plus prometteur – et nettement plus fiable que celui d'Oak Ridge.

### RESTE À PEAUFINER LA FORMULE

Un succès d'estime inébranlable partagé, sur le plan de la sûreté, avec le concept des réacteurs à très haute température (voir ci-contre). A ceci près que le réacteur à sels fondus offre beaucoup d'autres avantages... En terme de non-prolifération: le thorium se transforme dans le réacteur en uranium 233, lequel rend la fabrication d'une bombe atomique très périlleuse. En matière d'économie de ressources: le thorium est quatre fois plus abondant sur Terre que l'uranium, et cette architecture de réacteur assure un haut rendement. Et aussi, en ce qui concerne les déchets radioactifs à vie longue: selon Daniel Heuer, du LPSC de Grenoble, *“en raison de la place occupée par le thorium dans le tableau périodique des éléments, il est beaucoup moins susceptible de former par capture neutronique les fameux ‘éléments transuraniens’ dangereux pour des dizaines de milliers d'années”*. Mieux encore: *“Dans la mesure où ce réacteur est ‘régénérateur’, il recycle de toute façon sans cesse son combustible.”* Laissant entrevoir la possibilité supplémentaire de brûler le plutonium militaire et autres déchets des réacteurs actuels.

Au final, les ingénieurs tiennent là un réacteur crédible et “acceptable”. Tandis que son coût de construction



▲ Dès 1965, une équipe d'Oak Ridge réussit l'exploit de faire tourner le prototype à sels fondus “MSRE” pendant 13 000 h, en ne rencontrant que des incidents minimes.

ne soulève pas d'inquiétudes. Bien sûr, il reste encore beaucoup à faire. Comme, par exemple, trouver des matériaux capables de résister sur le long terme aux effets combinés des radiations, d'une éventuelle corrosion liée aux impuretés du liquide et de la très haute température présente dans ce cœur (800 °C contre 320 °C dans un réacteur actuel). D'aucuns ressentent aussi une certaine appréhension à l'idée de voir toute cette matière fissile “se balader” littéralement dans l'ensemble des circuits, échangeurs de chaleur et autres pompes. *“Nous étudions en ce moment l'éventualité d'une large brèche dans l'un de ces tuyaux”*, précise Elsa Merle-Lucotte. Quoi qu'il en soit, fait remarquer Daniel Ingersoll, actuel responsable des

programmes d'Oak Ridge, *“ce concept présente suffisamment de mérites pour que l'on cherche à en savoir plus”*. Et *“même si des recherches substantielles restent à mener, admet Victor Ignatiev, il n'y a rien dans ce réacteur qui ne puisse être résolu”*. Pour peu que l'on s'en donne les moyens!

Alors, pourquoi? Pourquoi diable cette petite merveille parée de tant d'atouts n'est-elle pas encore devenue réalité industrielle? Pourquoi faut-il un traumatisme à l'échelle de la catastrophe de Fukushima pour oser espérer les premiers réacteurs à sels fondus au thorium? Un acteur majeur pourrait-il se lancer dans cet autre nucléaire? Une chose est sûre: depuis Fukushima, toutes ces questions se posent avec acuité. ■

# ET D'AUTRES NUCLÉAIRES SONT DANS LES TIROIRS

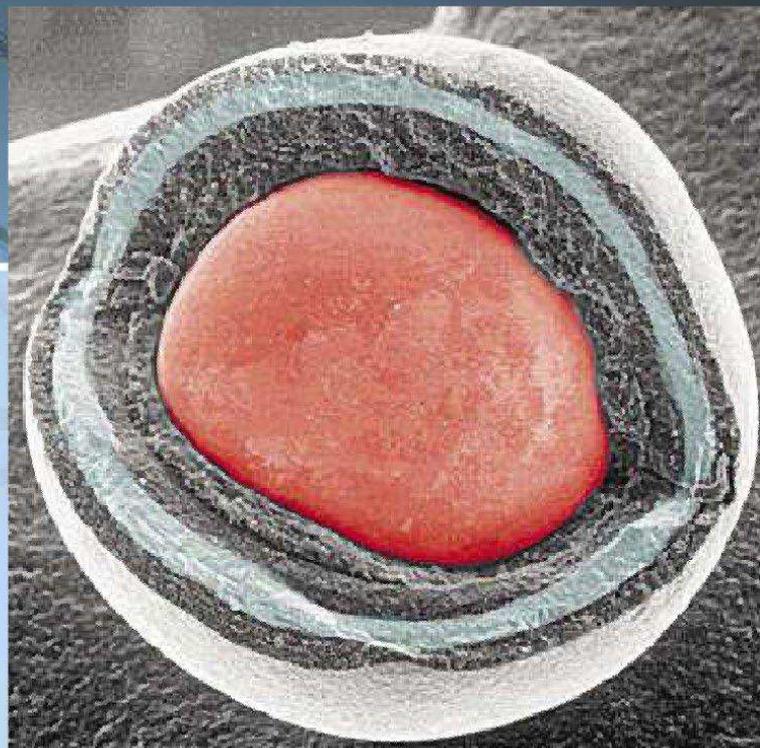
L'un de ces concepts, nés dans l'effervescence des années 1950-60, donnera peut-être naissance aux réacteurs de demain, ceux de la "génération 4". Passage en revue.

## LE RÉACTEUR À HAUTE TEMPÉRATURE REFROIDI À L'HÉLIUM

**PRINCIPE:** du combustible uranium sous forme de microbilles (0,5 mm de diamètre), logé dans un grand bloc de graphite, refroidi par de l'hélium gazeux.

**COMMENTAIRES:** depuis la fin des années 1960, les experts en sûreté nucléaire ont les yeux de Chimène pour ce concept. "Voilà une machine dont on ne peut pas imaginer qu'elle entre en fusion, à tel point qu'elle pourrait très bien se passer d'une enceinte de confinement et de certains systèmes de secours", relate l'ingénieur Bertrand Barré, dont l'entreprise, Areva, dispose d'un tel projet (Antarès) dans ses cartons. Et pour cause ! Ses énormes blocs

de graphite intégrés au cœur lui confèrent des capacités thermiques sans égales, permettant à la chaleur du combustible de se dissiper naturellement vers l'extérieur. Il n'y a pas à craindre, non plus, d'emballement : son combustible très dispersé affiche une densité de puissance dix fois moindre que celle des réacteurs actuels. Ces propriétés n'ont échappé à personne. Oui, mais voilà, hormis quelques prototypes intéressants (aux Etats-Unis, en Allemagne, au Japon...), l'aventure n'est guère allée plus loin pour l'instant ! Pourquoi ? C'est que, pour arriver à un tel niveau de sécurité, il faudrait construire un réacteur



aux dimensions titanesques. "C'est une véritable usine à gaz, très difficile à exploiter", regrette Giovanni Bruna, de l'IRSN. "Ce réacteur ne peut pas être économique pour une production d'électricité en masse, estime Bertrand Barré. Je le crois plutôt destiné à des marchés de niche." Ce qui n'est même pas certain car, détail quasi rédhi-

bitoire, cette technologie ne résout en rien le problème des déchets radioactifs – de surcroît, personne ne sait comment gérer le graphite irradié. Reste que, défend Giovanni Bruna, "nos recherches visant à traiter ces problèmes ont été stoppées prématurément pour des raisons budgétaires". Tout espoir n'est donc pas perdu...

## ET AUSSI...

### LE RÉACTEUR REFROIDI... AU PLOMB

**PRINCIPE:** des barres de combustible au nitrate d'uranium ou de plutonium, refroidies à l'aide de plomb fondu.

**COMMENTAIRES:** en cas d'arrêt d'urgence, le plomb liquide assure un refroidissement du combustible par convection, c'est-à-dire sans pompe électrique. Concrètement, les seuls

réacteurs au plomb utilisés jusqu'à présent l'ont été au sein des sous-marins d'attaque soviétiques de classe Alfa... dont deux au moins ont connu un accident nucléaire grave. Car le plomb s'avère extrêmement corrosif pour les structures du réacteur et, en plus, il rend très difficile toute inspection des circuits. Autant de difficultés qu'il reste à surmonter.

### ... AU GAZ

**PRINCIPE:** des pastilles d'uranium, entourées d'une couche de céramique, refroidies avec de l'hélium gazeux.

**COMMENTAIRES:** ce dispositif promet une très bonne utilisation des ressources d'uranium, un haut rendement et une production minimale de déchets. Sur le papier seulement... Pour l'heure, rien de concret et beaucoup d'incertitudes.

### ... À L'EAU SUPERCRITIQUE

**PRINCIPE:** des barres de combustible uranium, refroidies par de l'eau à la fois liquide et gazeuse.

**COMMENTAIRES:** l'état supercritique de l'eau évite des problèmes de sûreté liés à la formation de vapeur, et promet un meilleur rendement. Mais cette idée, encore théorique, soulève des craintes.

# LE NUCLÉAIRE PEUT-IL CHANGER DE CAP ?

*Des réacteurs au thorium verront-ils le jour ? Il faudrait pour cela que la filière revoit ses dogmes. Or, elle n'en prend pas le chemin...*

La sécurité des populations, le retraitement des déchets... Disons-le tout net : il y a 50 ans, les pionniers du nucléaire s'en fichaient éperdument ! Un désintérêt – teinté de naïveté – que l'on retrouve dans le dessin des réacteurs de l'époque... Depuis cette période héroïque, et au fil des déboires, le discours de l'industrie nucléaire a bien changé, mais pas l'architecture fondamentale de ses réacteurs. Et ce sont ces machines, aux lacunes évidentes et largement décriées, qui continuent de s'imposer au monde entier. Même les nouveaux réacteurs, tel le dernier-né français EPR (photo ci-contre) qui se présente paré de tous les atouts de la nouveauté, ne sont que les derniers rejetons de cette lignée. Comme si cette filière était incapable de la moindre remise en question, comme s'il lui était impossible de faire de la place à "un autre nucléaire" à la sûreté irréprochable ! D'où la question : un concept aussi enthousiasmant que le réacteur au thorium (voir p. 60) peut-il s'imposer à l'avenir ?

Il faut d'abord le savoir : dans le monde du nucléaire, la nouveauté effraie. Charles Forsberg, chercheur au département nucléaire du MIT, explique les ressorts de cette méfiance : "Face à une technologie largement maîtrisée, il est difficile de privilégier un nouveau dessin qui, certes, promet des résultats meilleurs sur le papier... sauf que le diable se loge dans des

détails insoupçonnés avant la conception." Or, même les plus fervents partisans du réacteur au thorium admettent que son architecture serait presque trop atypique. Le simple fait que son combustible se présente sous forme liquide et non solide bouleverse tous les repères des concepteurs. Comme le reconnaît Victor Ignatiev, physicien à l'Institut Kurchatov (Moscou), et pourtant farouche pro-thorium, les autorités de sûreté risquent aussi d'être désarçonnées : "Pour certifier ces machines, il leur faudra redéfinir tout le spectre classique des scénarios d'accidents."

## 14 000 ANNÉES D'EXPÉRIENCE !

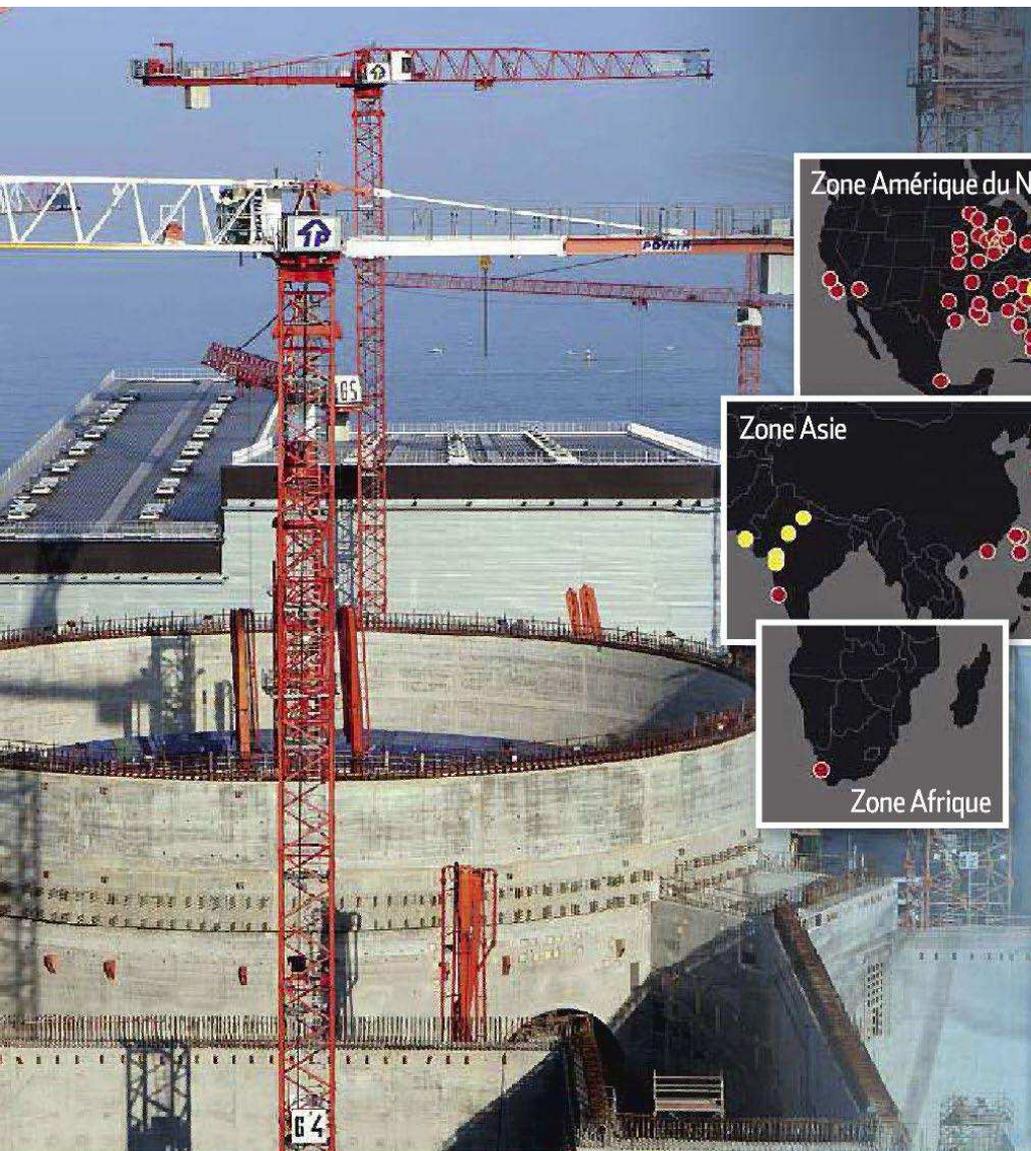
La défiance est partout, y compris lorsque des organismes officiels, tels le CEA, planchent à l'horizon 2040 sur les remplaçants des machines actuelles – EPR inclus. L'effort de recherche autour de ce projet ("génération 4") a beau être massif, celui-ci fait bien pâle figure face aux 14 000 années d'expérience accumulées par les réacteurs aujourd'hui en place ! Soit autant de petits incidents riches d'enseignement, d'hommes acquis à la cause, de codes de calcul et de techniques développés, de sommes folles engagées dans le parc mondial... Tandis que, souligne encore Daniel Ingersoll, du laboratoire d'Oak Ridge (Tennessee), "en nucléaire, il faut des dizaines d'années pour démontrer que l'on a trouvé un meilleur chemin :



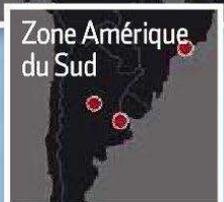
La dernière génération de réacteurs, tel l'EPR en construction à Flamanville, reste dans la lignée de ses prédécesseurs.

une première décennie pour voir un nombre raisonnable de centrales se construire, et puis une ou deux autres pour juger sur pièce des progrès". Cette prudence maniaque n'aurait rien de scandaleux si seulement la concurrence entre les réacteurs existants et les nouvelles architectures "plus sûres, plus propres, plus efficaces" était saine ! Seulement voilà : l'industrie nucléaire a toujours montré une volonté farouche de ne jamais se départir du schéma de ses réacteurs originels... quelles que soient leurs lacunes. Au grand dam de quelques chercheurs intrépides.

Mais comment a-t-on pu en arriver à un monde couvert de réacteurs à la fois quasi indétrônables et loin d'être irréprochables ? Depuis son bureau des laboratoires d'Oak Ridge, berceau originel de l'énergie nucléaire, Daniel Ingersoll avance une piste : "Aux débuts du nucléaire, les chercheurs faisaient peu de cas des risques potentiels, et



● Centrales à eau légère  
● Autres technologies

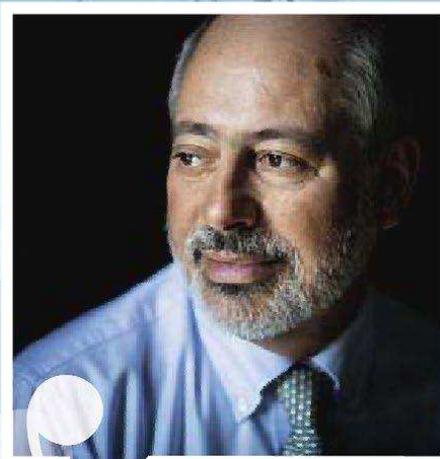


## Une filière à sens unique

Sur les 432 unités nucléaires – réparties en centrales – actuellement en activité dans le monde, 83 % sont des réacteurs dits à “eau légère” (eau pressurisée ou eau bouillante). Plus frappant : des 30 pays nucléarisés, 27 possèdent au moins un réacteur de ce type. A noter que la Grande-Bretagne et le Canada s’appuient, eux, sur leur propre modèle de réacteur, respectivement à gaz et à eau lourde.

donc la sûreté intrinsèque des différents réacteurs envisagés n’était pas importante, parce qu’il régnait alors un fort sentiment d’urgence.” Quelle urgence? Celle, pour commencer, de la course à la bombe atomique lors de la Seconde Guerre mondiale. Les choix de réacteurs ont en effet été guidés par... leur capacité à produire le plus rapidement possible du plutonium! Les Américains avaient alors opté pour des piles à l’uranium entourées de graphite et refroidies à l’eau, ancêtres des réacteurs soviétiques RBMK de Tchernobyl. De toute évidence, les attributs de sûreté de ces premières unités militaires n’étaient pas une priorité. Or, ce manque criant va ensuite concerner la propulsion nucléaire des sous-marins, nouvelle priorité des Etats-Unis après la guerre. La rivalité avec l’URSS commande, là aussi, d’aller au plus vite. Parmi une dizaine de concepts, l’amiral Hyman Rickover, en 1949, jette son

dévolu sur celui défendu par un physicien d’Oak Ridge, Alvin Weinberg: il s’agit du fameux “réacteur à eau sous pression” (REP), dont 58 spécimens trônent aujourd’hui en France! Pourquoi cette décision initiale? Eh bien, l’engin promet d’être simple – pour ne pas dire rustique – donc rapide à mettre en œuvre, et il est aussi très compact. “C’était l’idéal pour un sous-marin, analyse Charles Forsberg. Dès lors, ce concept a pu se perfectionner avec l’appui massif de la Navy, laquelle n’avait aucune limite de financement.” Conséquence directe: à l’heure de retenir un type de réacteur civil producteur d’électricité, l’Atomic Energy Commission choisit le REP, pour la simple raison qu’il est... déjà fin prêt. Encore une fois, l’urgence voire la précipitation, marque au fer rouge l’histoire de l’atome! Qu’importe si, raconte Robin Cowan, historien des techniques à l’université de Strasbourg, “à l’époque, →



**JACQUES REPUSARD**

DIRECTEUR DE L’INSTITUT DE RADIO-PROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN)

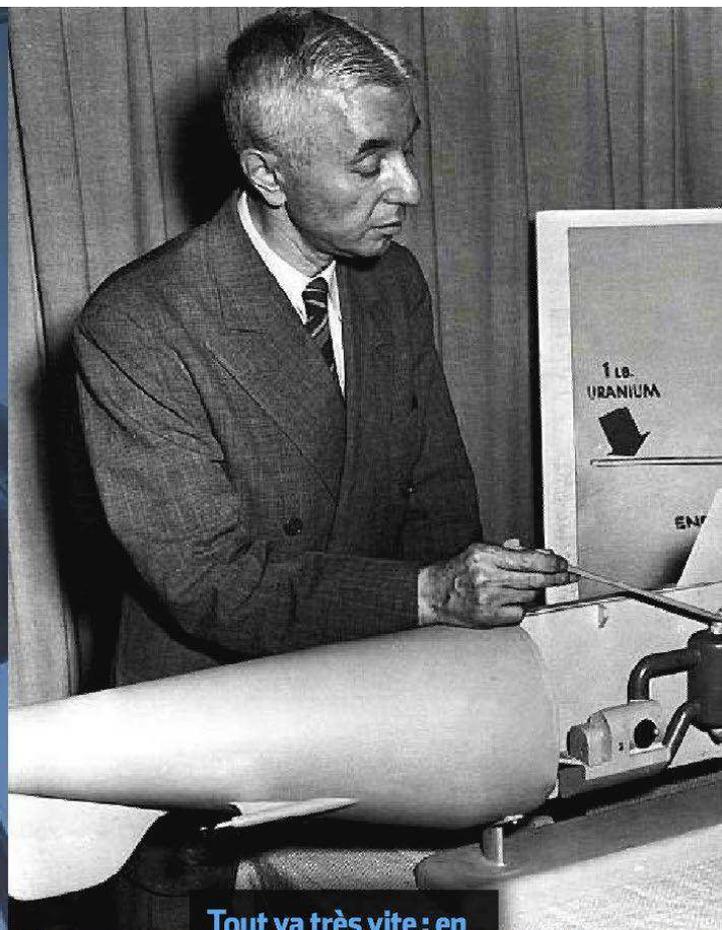
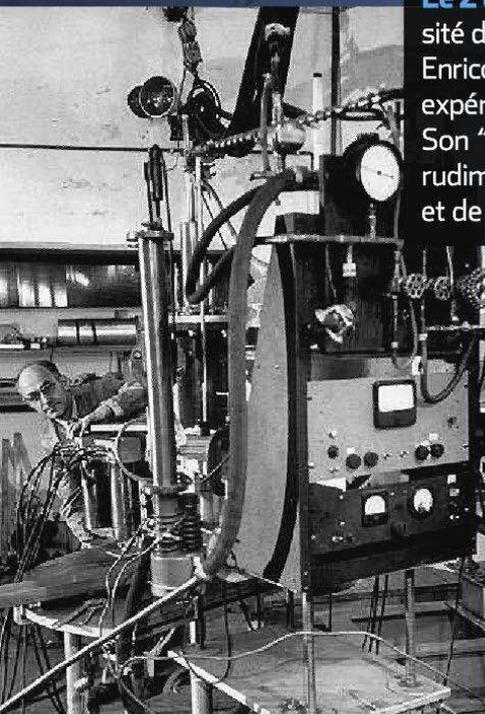
*Il me semble que l’industrie nucléaire a cessé de réfléchir depuis longtemps...*

## Les 6 dates clés qui ont installé la domination du réacteur à eau sous pression

**Le 2 décembre 1942**, à l'université de Chicago, le physicien Enrico Fermi réalise la première expérience de fission contrôlée. Son "réacteur" est un empilement rudimentaire de blocs d'uranium et de graphite.

**Le 18 septembre 1944**, l'un des acteurs du projet Manhattan, Alvin Weinberg, signale les vertus possibles d'un dispositif à eau sous pression pour... produire de l'énergie. Les premiers brevets vont tomber dès 1945.

**Tout va très vite : en 1949**, l'amiral Hyman Rickover (photo) jette son dévolu sur ce concept pour équiper les sous-marins de la puissante US Navy.



→ les chercheurs estimaient, eux, qu'il était encore trop tôt pour déterminer la meilleure voie à suivre". Alvin Weinberg lui-même s'avouera surpris par cette décision hâtive d'autant plus que "dans ces premiers instants, nous n'avons presque jamais comparé la sûreté intrinsèque de ce réacteur avec celle de ses concurrents", regrette-t-il dans ses mémoires. Las, les scientifiques n'ont plus voix au chapitre. Deux grands industriels, General Electric et Westinghouse, ont pris la filière en main. Toujours avec ce sentiment d'urgence : suprématie stratégique face au bloc de l'Est, concurrence industrielle face au charbon bon marché.

En décembre 1957, le premier REP démarre à Shippingport (Pennsylvanie). Pour les autres concepts, il est déjà trop tard... Et ce, avant même que leurs possibles mérites aient pu être éprouvés

et reconnus. De fait, explique Robin Cowan, "la technologie nucléaire, nouvelle dans les années 1950, demande une masse phénoménale d'apprentissages à acquérir et d'incertitudes à lever : en atteignant ce seuil le premier,

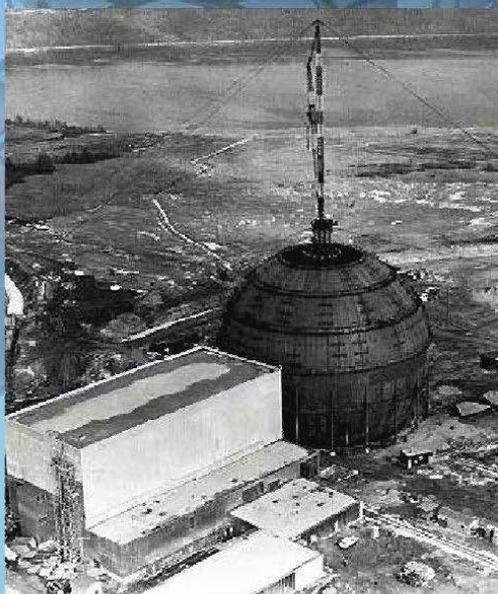
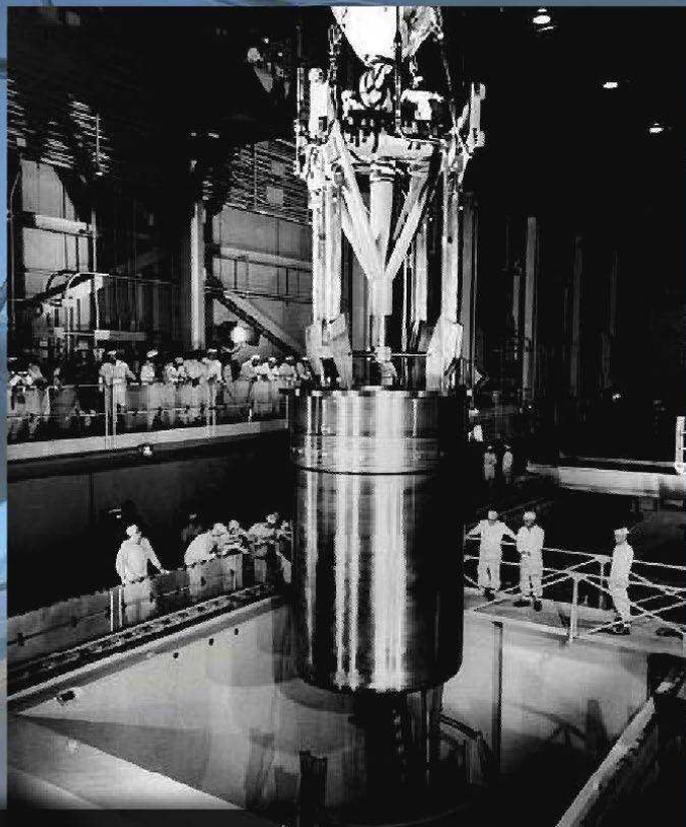
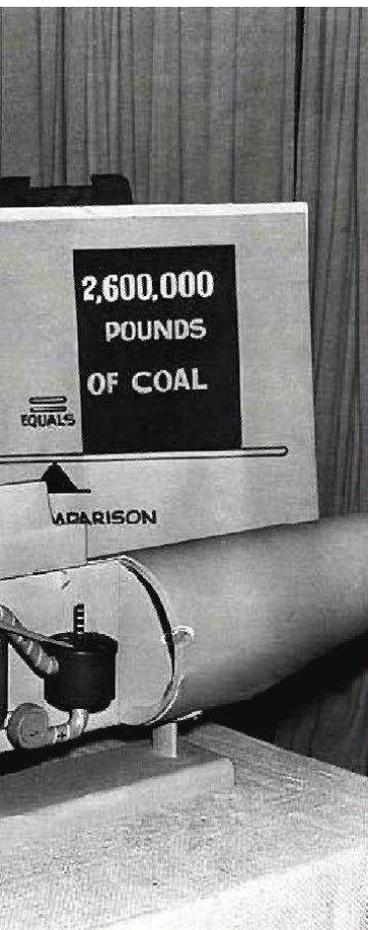
### LAS, FACE À L'INDUSTRIE, LES SCIENTIFIQUES N'ONT PLUS VOIX AU CHAPITRE

le REP a étouffé ses adversaires". Avant d'ajouter que "le même phénomène de verrouillage technologique s'est produit pour le moteur à combustion interne de nos voitures." Notez bien toute l'injustice d'un tel verrouillage : dès lors qu'un concept alternatif n'existe que sur le papier ou n'a fait l'objet que de modiques expériences, les tenants de l'industrie ont beau jeu de crier à la spéculation...

Tandis que personne ne se donne plus les moyens de pousser plus loin les investigations sur ces alternatives !

Mais qu'en est-il alors de la nécessaire maîtrise des risques entourant ces installations atomiques civiles ?

Car, très tôt, Alvin Weinberg avait fait part de ses doutes sur les propriétés de sûreté de son "bébé", le REP. Des doutes bien compréhensibles, tant les griefs sont nombreux (voir p. 67). Durant la première décennie, les passes d'armes sont légion entre les ingénieurs de l'industrie dopés à l'optimisme et les chercheurs d'Oak Ridge, lesquels misent eux sur le très différent réacteur au thorium. En fait, "les ingénieurs avaient la conviction à cette époque qu'ils parviendraient à rendre n'importe quel type de réacteur aussi sûr que désiré",



**Dans les années 1960,** les industriels américains organisent une brutale montée en puissance de la filière à eau : en 1960, Dresden (photo) et ses 200 MW est mis en service, un autre réacteur de 500 MW démarre en 1969 alors que la construction d'un monstre de 1100 MW a commencé dès 1966.

**Le 2 décembre 1957** signe la sortie des eaux du réacteur à eau sous pression : le prototype de Shippingport (60 MW), dans la banlieue de Pittsburgh, est le premier réacteur civil électrogène.

se souvient Richard Engel, un ancien d'Oak Ridge. Après tout, il suffirait de l'entourer de plusieurs couches de protections... Pas si simple, apparemment : le 28 mars 1979, le cœur du réacteur de Three Miles Island (Pennsylvanie) entre en fusion. Cet accident fait l'effet d'une onde de choc ! La Suède, les Pays-Bas et l'Autriche décident même de se détourner du nucléaire. Alors que le rejet de l'atome commence à gagner le public américain, un groupe de chercheurs (dont Alvin Weinberg) et d'anciens responsables de l'Atomic Energy Commission, comme rongés par les regrets, appellent dès 1980 à repartir sur de nouvelles bases.

Ces prestigieux dissidents parlaient alors d'ouvrir une "deuxième ère du nucléaire". Sans aller jusqu'à remettre en question la sûreté des centrales existantes, ils voulaient reconquérir

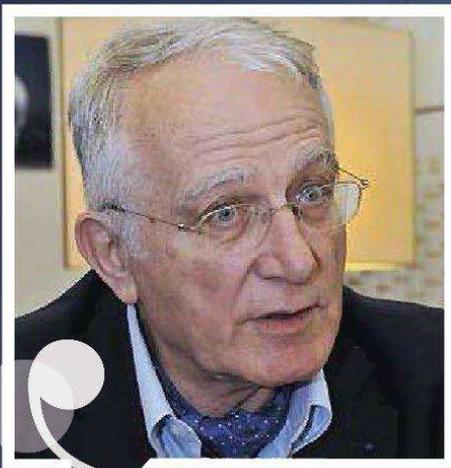
la confiance de la population en lui proposant un engin au comportement docile par nature. C'est-à-dire un réacteur tout bonnement incapable d'entrer en fusion et dont la sûreté reposerait sur les lois immuables de la physique, de la chimie et de la mécanique.

#### LA "SÛRETÉ INTRINSÈQUE" REJETÉE

Le raisonnement est imparable, souligne Jack Barkenbus l'une des figures de ce mouvement : *"Nous voulions des réacteurs à la sûreté intrinsèque et manifeste, et non plus des réacteurs dont la stabilité dépendait du bon fonctionnement d'une valve ou d'un opérateur, et dont les probabilités de défaillances affichées étaient sujettes à contestation."* Et cette démarche vise bien autre chose que l'élégance, poursuit le chercheur pour qui *"il était crucial que les réacteurs nucléaires →*

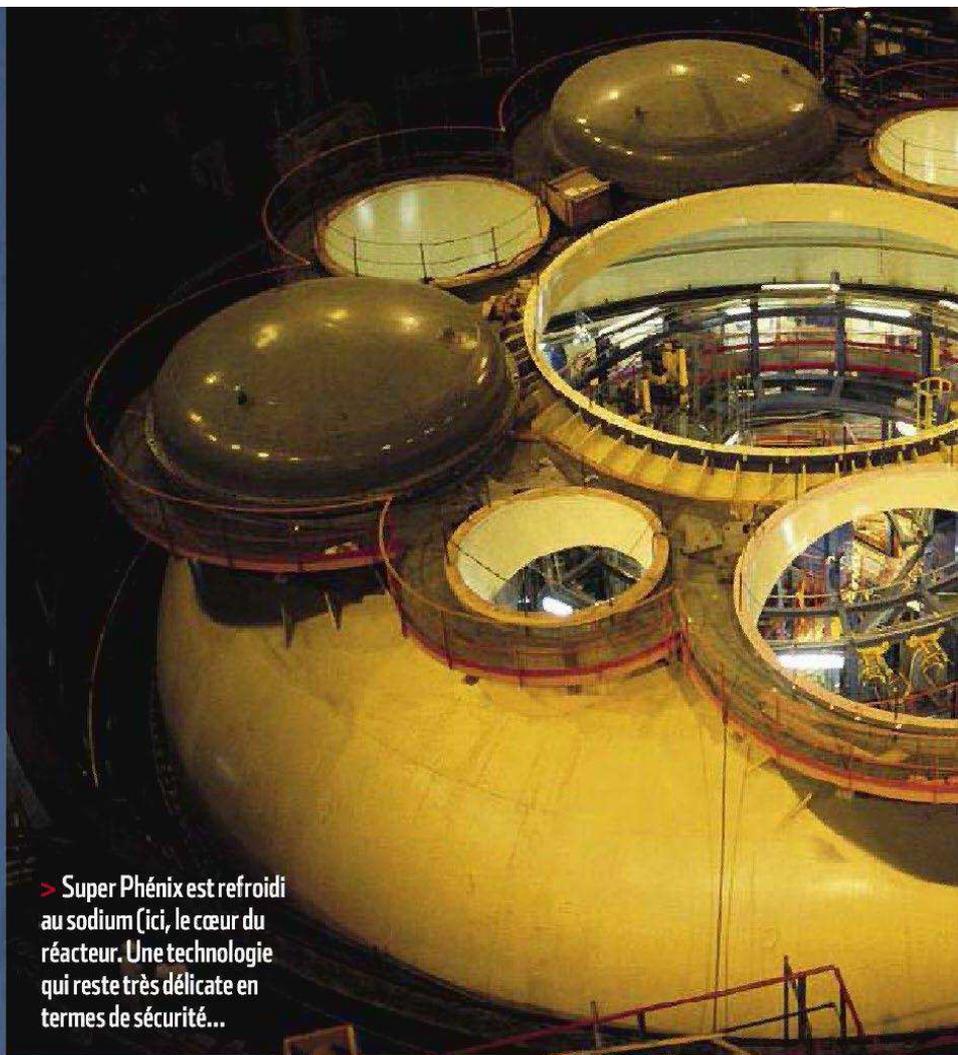
## Un poids budgétaire

Rien qu'en France, cette filière des réacteurs à eau sous pression nourrit, selon Areva, 410 000 personnes (emplois directs et indirects). Ce nucléaire constituerait aussi 2 % de notre richesse nationale, avec des champions tricolores comme EDF et Areva. Le parc français de 58 réacteurs à eau aura demandé un investissement public de quelque 77 milliards d'euros. Un investissement qu'il serait bien difficile d'abandonner...



**BERTRAND BARRÉ**  
CONSEILLER SCIENTIFIQUE D'AREVA

*L'inertie du système est telle qu'il faudra trouver un avantage décisif pour dévier notre paquebot de sa trajectoire*



> Super Phénix est refroidi au sodium (ici, le cœur du réacteur). Une technologie qui reste très délicate en termes de sécurité...

→ soient non seulement sûrs mais qu'ils puissent être vus comme sûrs par le public – ce que je continue à penser aujourd'hui". Peine perdue... Les quelques architectures répondant au moins en partie à ces critères (tel le réacteur à haute température, voir p. 71) ont été largement ignorées par le secteur. D'autant plus que, déplore Jack Barkenbus, "vanter des réacteurs à la 'sûreté intrinsèque' risquait, selon les industriels, de renvoyer une image trop négative des installations existantes". Dès lors, un constat s'imposait à tous: la filière REP semble bel et bien verrouillée à double tour! Charge aux ingénieurs de continuer à empiler de nouvelles parades autour de ce dessin immuable, loin d'être dénué de qualités, mais dont les nombreuses tares de naissance demeurèrent toujours aussi embarrassantes en 2011. Voilà où nous en sommes...

A moins que la catastrophe de Fukushima n'administre un dernier coup de pied décisif dans la porte d'entrée de la filière? Laissant, du coup, une petite ouverture à la machine au thorium... Pourquoi pas, car l'atome n'a jamais été autant remis en question. Bien sûr, la fiabilité des réacteurs a progressé depuis 1979: des ajustements ont été apportés, depuis, pour minimiser les risques de fusion.

## UN CONSTAT S'IMPOSE : LA FILIÈRE "REP" EST BEL ET BIEN VERROUILLÉE

Et puis, au fil des incidents et des nouveaux résultats scientifiques, les réacteurs ont fait l'objet d'améliorations continues – il en sera de même après Fukushima, comme le prouve déjà le durcissement des recommandations de sécurité. Reste que, rien de vraiment radical n'en est ressorti: "Pour

emprunter une métaphore, on a encore le sentiment de voler sur des avions des années 1960, assène Jacques Repussard, directeur de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Il me semble que le nucléaire a cessé de réfléchir depuis longtemps..." Le propos est sans concession pour les concepteurs. Lesquels invoquent, de leur côté, la difficulté croissante d'intervenir sur le dessin initial des REP. Le moindre ajout exige, en effet, une bonne décennie de recherche afin de s'assurer de l'absence d'effets secondaires sur le reste de l'installation.

"Alors que nous devons prendre garde à ne pas trop compliquer le schéma d'ensemble, car la compréhension de nos lignes de défense est aussi un critère de sûreté", insiste Georges Servière, conseiller nucléaire du président d'EDF. La saturation est aujourd'hui toute proche. "Je ne crois pas qu'ajouter des 'pansements' sur un réacteur d'ancienne génération



*soit la meilleure approche possible”, suggère Daniel Ingersoll. Il est vrai qu’accumuler des rustines sur un pneu usagé n’est pas des plus rassurants. Tandis que chercher à améliorer les lignes de sécurité existantes semble être une gageure : ainsi, les gaines entourant le combustible du flambant neuf réacteur EPR sont toujours en zirconium, un matériau connu depuis fort longtemps pour aggraver la situation en cas de perte du refroidissement du cœur... “Nous avons songé remplacer ce matériau, mais cela demandait finalement des modifications trop importantes ailleurs”, soupire Georges Servière. Faute de réforme en profondeur, les spécialistes de la sûreté en sont maintenant réduits à ruser (voir encadrés p. 78) pour grappiller ici ou là quelques progrès. Or, malgré ces perspectives, malgré les probabilités infimes de contamination affichées par les réacteurs dernière génération (le français EPR, l’américain AP-1000...), →*

## LA FRANCE MISE À L’AVENIR SUR... L’ANTIQUE SUPER PHÉNIX

Pour la France, l’avenir du nucléaire semble scellé : il se dessinera autour de “réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium”. Que nous vaut ce verrouillage anticipé ? Simple : notre pays a déjà construit par le passé trois spécimens de ce type (les prototypes Rapsodie et Phénix puis le réacteur Super Phénix). C’est donc fort de ce savoir-faire que 300 chercheurs du CEA et d’Areva planchent sur un nouveau prototype remis au goût du jour. La construction d’Astrid doit démarrer à Marcoule (Gard) dès 2017... La France n’est, d’ailleurs, pas isolée : Russie, Chine, Japon, Angleterre et Inde misent aussi sur cette idée. Car l’industrie nucléaire ne consent désormais à faire que... ce qu’elle sait déjà faire ! Or, ce choix de concept ne manque pas d’interroger. Car si ces réacteurs refroidis au sodium bénéficient certes d’une grande expérience, celle-ci n’est franchement pas rassurante ! D’autant plus que les qualités naturelles de sûreté de ces réacteurs sont loin d’être évidentes... Ainsi le

sodium qui circule dans leurs veines a causé de très sérieux incidents sur le réacteur français Phénix, mais aussi sur les prototypes PFR (Angleterre) et Monju (Japon) – lequel a dû être fermé durant quinze ans.

### Ajouter un risque...

De fait, le sodium brûle à l’air libre et réagit violemment au contact de l’eau. En somme, grogne-t-on chez les garants de la sûreté, “on ajoute un risque chimique au risque nucléaire”. Lequel n’est pas si négligeable ici : en effet, souligne Jean Couturier, directeur adjoint de la sûreté des réacteurs à l’IRSN, “si son combustible perd le contact avec le sodium dans lequel il baigne (à la suite d’une bulle de gaz, d’une fuite...), la réaction en chaîne s’accélère – à l’inverse des réacteurs actuels qui eux s’éteignent !” Ce cœur nucléaire impétueux, capable de fondre en une minute, semble bien difficile à apprivoiser : “Entre 1989 et 1990, le réacteur Phénix a connu quatre arrêts d’urgence automatiques que l’on ne

*s’explique toujours pas malgré nos efforts acharnés”, révèle Jean Couturier. Une incertitude qui n’a rien pour apaiser les esprits. Même si les chercheurs du CEA travaillent d’arrache-pied pour réduire tous ces défauts criants, et même si ce concept n’est bien sûr pas dépourvu de quelques belles qualités. Au total, remarque Sylvain David, de l’Institut de physique nucléaire d’Orsay, “il n’est pas dit que ces réacteurs puissent atteindre un jour le niveau de sûreté d’un réacteur EPR, condition sine qua non à leur construction dans l’Hexagone”. D’où cette question : la France n’est-elle pas en train de se précipiter dans une impasse avec Astrid ? Il y a une explication à ce projet phare, reconnaît Franck Carré, directeur scientifique au CEA, “c’était le seul moyen de relancer notre R&D sur le nucléaire du futur, à l’heure où d’autres pays ont repris le leadership”. Avant de conclure, lucide : “Pour autant, il faut aussi continuer à explorer d’autres voies...”*

# Sûreté nucléaire : réacteurs actuels cherchent solutions

## Les mettre à l'abri ?

A l'air libre, les réacteurs nucléaires sont vulnérables aux catastrophes naturelles. D'où la proposition de les enterrer, dans le but d'échapper aux pires tempêtes mais aussi aux crashes d'avions et actes de terrorisme. Qui plus est, "cela évite la diffusion d'un large nuage radioactif et donc la contamination de régions entières", ajoute Hooman Peimani (université de Singapour), qui vient de proposer cette solution au gouvernement de Singapour. Pour autant, concède le chercheur, cela n'a rien d'une panacée: "Il faut disposer du sous-sol idoine, éloigné des zones sismiques et des nappes phréatiques. Et puis, l'évacuation de la chaleur du cœur est aussi un défi ici..." Mais un autre concept, prometteur, vient d'être émis par la Direction française des constructions navales: immerger les réacteurs au fond des mers! Car, "non content de ne pas ressentir les effets d'un tsunami par 100 m de fond, ces réacteurs bénéficieraient à tout moment d'une source de refroidissement infinie", revendique André Kolmayer, responsable du projet Flexblue. Cependant, sa faisabilité technique reste incertaine. Pas sûr, également, qu'une telle colonisation des océans soit acceptée de sitôt...



→ le fond du problème soulevé après Three Miles Island n'a pas changé.

A l'heure où le très improbable s'est invité à Fukushima, Jean Couturier responsable du thème "réacteurs du futur" à l'IRSN confirme que "l'idéal à poursuivre serait bien d'éliminer les problèmes de sûreté par des choix de conception, plutôt que de chercher à les atténuer a posteriori. Cela passe par la recherche d'un type de réacteur qui, en cas de perturbation, se remettrait de lui-même dans son état d'équilibre sans dommages". Même si cela ne sera peut-être pas suffisant pour convaincre tous les antinucléaires...

## CONCEPTS CRÉDIBLES ABANDONNÉS

Qu'attend donc l'industrie pour lancer toutes ses forces à la poursuite de cet idéal? Cette quête ne s'annonce-t-elle pas prometteuse, tant l'histoire de l'atome est jonchée de cadavres de concepts crédibles, à commencer par le réacteur au thorium? Pour l'heure, Areva et consorts travaillent plutôt à faire durer le plus longtemps possible l'architecture actuelle des réacteurs, en cherchant par exemple à réduire

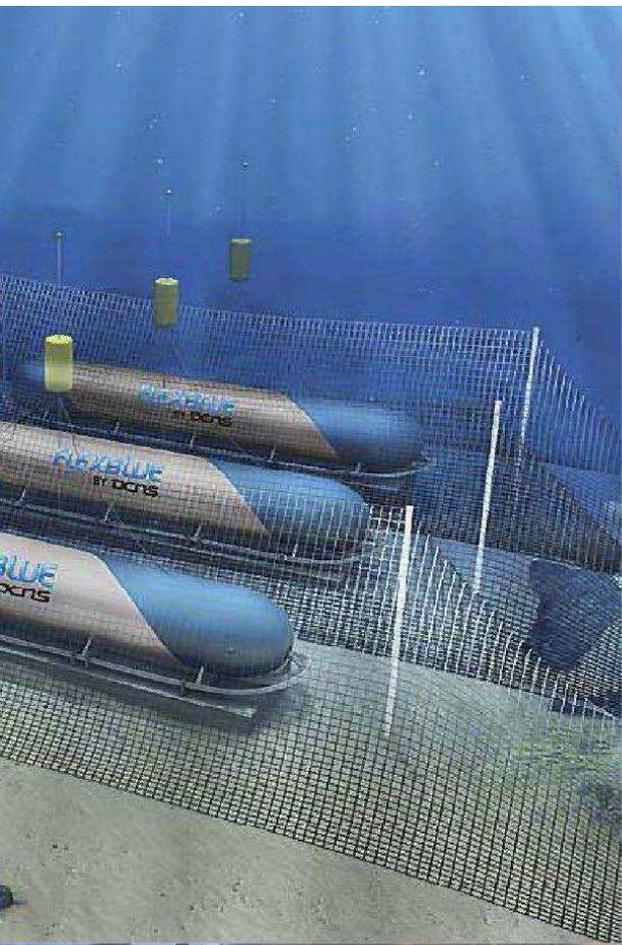
## Abaisser leur puissance ?

Pour des raisons économiques, l'industrie a conçu des unités toujours plus grosses, tel l'EPR et ses 1600 MW. Or, un réacteur moins puissant est plus facile à refroidir. Et puis un petit cœur nucléaire offre une plus vaste surface d'échange thermique au regard de son volume. A tel point que les concepteurs de mini-réacteurs (moins de 300 MW) assurent pouvoir se passer de l'injection d'eau froide! Des investisseurs comme Bill Gates ou Toshiba sont attirés. Pour autant, remplacer le parc par des unités de petite taille rendrait-il le nucléaire plus sûr? Comme le fait remarquer Giovanni Bruna (IRSN), "une grande série de mini-réacteurs serait vulnérable à la même inondation par exemple - regardez Fukushima. Est-on sûr que cela ne produira pas des problèmes nouveaux, et peut être graves, par simple effet de proximité?" A contrario, s'alarme Georges Servière (EDF), "multiplier les sites nucléaires différents demanderait à l'opérateur des moyens de surveillance décuplés". Sans parler des risques de prolifération... Au final, les bénéfices réels ne sont pas si évidents.

leur consommation en uranium. La preuve d'un aveuglement volontaire et définitif? Bertrand Barré, conseiller scientifique d'Areva, s'en défend: "Nous avons toujours été attentifs à ce qui se passait ailleurs dans les labos, pour être sûrs de ne pas avoir raté une bifurcation. Mais voilà, l'inertie du système est telle qu'il faudra trouver

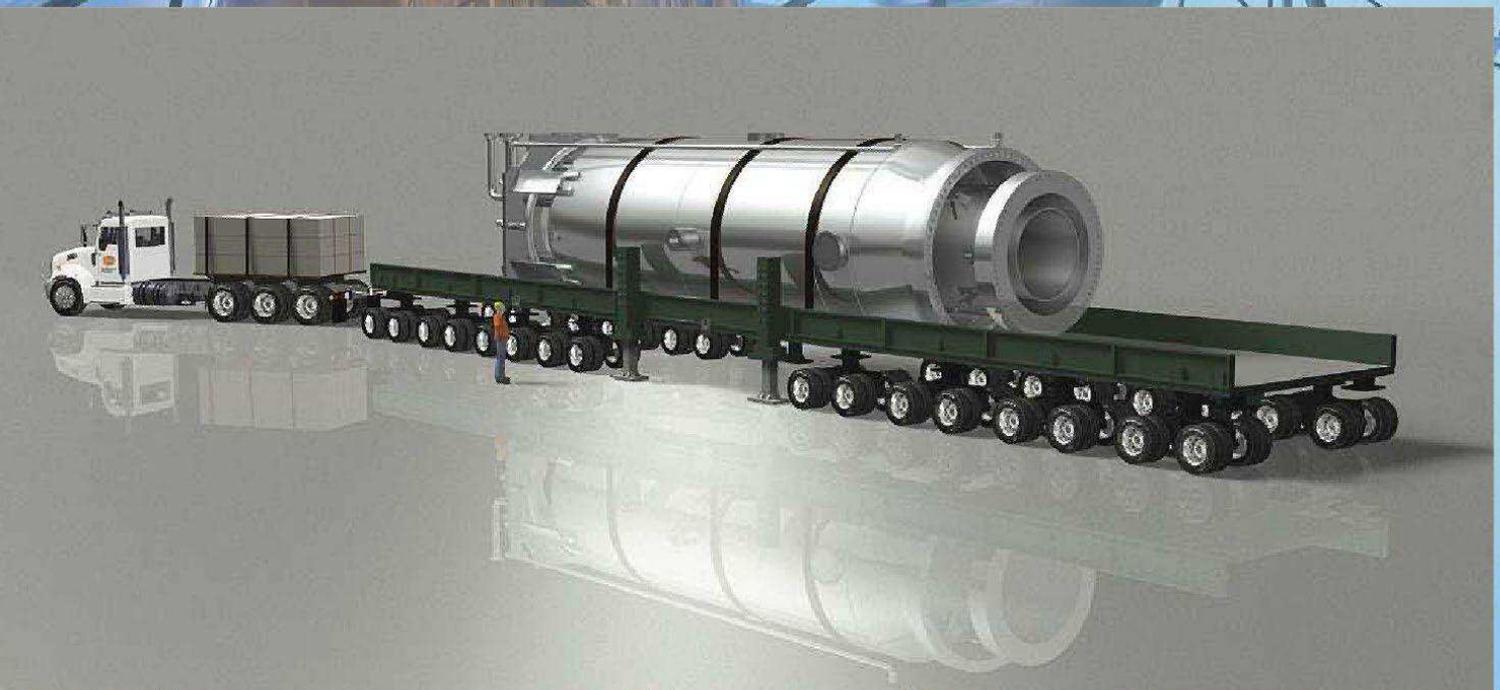
un avantage décisif pour dévier notre paquebot de sa trajectoire."

La perspective d'un autre nucléaire est emballante, les bonnes idées ne manquent pas, mais l'effort s'annonce colossal avant de bousculer l'ordre établi il y a cinquante ans. Or le temps presse pour l'atome, aujourd'hui menacé de toutes parts... ☒



## Les rendre plus autonomes ?

Privé d'électricité, un réacteur nucléaire court à sa perte : faute d'être arrosé par les pompes, le combustible brûlant fond en quelques heures seulement, sans que personne ne puisse rien y faire. Les concepteurs voudraient donner plus de temps aux responsables pour agir – on parle de "délai de grâce". Comment ? En installant des dispositifs de secours fonctionnant à partir des forces naturelles (gravité, convection, conduction...) qui prendraient en charge le refroidissement. Déjà converti à cette philosophie, le nouveau réacteur américain AP-1000 assure offrir trois jours de sursis. Cette stratégie pleine de promesses fait cependant débat parmi les ingénieurs, spécialement en France. De fait, son efficacité n'a toujours pas été démontrée en grandeur nature et dans des conditions accidentelles. Pis, on craint leur déclenchement intempestif. Bertrand Barré (Areva) révèle que *"chez Areva, nous avons estimé qu'il fallait utiliser cette stratégie avec parcimonie. Au vrai, une bonne pompe – quand elle marche, certes – est toujours nettement plus efficace que la simple gravité"*. Reste que cette "sûreté passive" des réacteurs est un champ de recherche en plein essor. A suivre, donc.



## Malheur aux alternatives ?

Le nucléaire n'est pas le seul secteur où une technologie a imposé un monopole... en dépit d'alternatives parfois très valables ! Concurrents originels du moteur à combustion, les moteurs électriques et la machine à vapeur Stanley n'ont pas eu la chance qu'ils méritaient. *Idem* pour le clavier Dvorak, assurant confort et efficacité, qui échoua en 1936 à remplacer le clavier AZERTY. Mais il n'y a pas de fatalité : un siècle après la bataille, le courant électrique continu regagne du terrain sur l'omniprésent courant alternatif.

ÉVÉNEMENT

APPLICATION iPhone & iPad

# skypix<sup>®</sup>

SCIENCE & VIE

## LE CIEL À PORTÉE DE MAIN

« Avec Skypix, nous avons développé la plus puissante et la plus complète application sur le ciel, fruit de toute l'expertise et du savoir-faire de Science & Vie ».

La rédaction de Science & Vie

