

Art et culture préhistorique

Il y a 14 000 ans, les populations des Pyrénées et du Nord de l'Espagne formaient un ensemble culturel homogène.

Qu'est-ce que la culture ? Les préhistoriens distinguent les populations, dans l'espace et dans le temps, d'abord sur la base des techniques qu'elles utilisaient pour tailler le silex : les outils en pierre sont les restes les mieux conservés. Les ensembles techniques ainsi définis étaient toutefois subdivisés en groupes culturels régionaux : aujourd'hui encore, des cultures très différentes utilisent les mêmes outils, tels les automobiles ou les ordinateurs. Les Magdaléniens, qui vivaient il y a 17 000 à 11 000 ans, ont fabriqué de nombreux objets d'art, qui permettent de préciser les contours de territoires culturels. Des fouilles récentes, en France et en Espagne, révèlent une unité artistique sur le versant Nord des Pyrénées et la côte Cantabrique, au Nord de l'Espagne. L'univers symbolique des populations de cette région était différent de celui de leurs voisins.

Il y a 14 500 ans, le climat de l'Europe se réchauffe. Le glacier qui recouvrait les Pyrénées fond. De nombreuses vallées deviennent accessibles. Des groupes humains investissent ce territoire, qui présente plusieurs attraits. Les nombreuses grottes qui s'ouvrent sur les versants sont des habitats accueillants. Elles sont en outre souvent prolongées par de longs réseaux de galeries souterraines, que les hommes utilisent comme sanctuaires. Le milieu naturel, en moyenne montagne, est riche : les chasseurs collecteurs exploitent autant les ressources en gibier de la vallée (rennes, chevaux, bisons et aurochs) que celles de la montagne (bouquetins et oiseaux).

Ces Magdaléniens taillent le silex comme ceux qui vivent dans le Sud-Ouest de la France, dans le Bassin parisien, en Allemagne et dans le Nord de l'Europe centrale. Ils sont aussi des artistes confirmés, qui maîtrisent toutes les techniques, de gravure, de dessin, de sculpture et de peinture, sur divers matériaux : 80 pour cent des objets d'art préhistoriques qui nous sont parvenus datent du Magdalénien.

Des objets *a priori* utilitaires, telles les armes de chasse, sont décorés, même lorsque leur usage est éphémère : des pointes de sagaies en bois de renne, facilement cassées pendant la chasse, sont gravées de volutes caractéristiques. Le propulseur, l'arme de chasse par excellence des Magdaléniens, qui permettait de lancer les sagaies avec force et précision, est aussi utilisé par les artistes. De nombreux propulseurs ont été sculptés de motifs animaliers. On retrouve le même thème sur plusieurs objets : un faon de cervidé dont la tête est tournée vers l'arrière. En outre, deux propulseurs quasi identiques décorés d'un bouquetin ont été découverts à plus de 600 kilomètres de distance, en Ariège et dans les Asturies. Qui a voyagé : l'artiste, l'objet ou l'idée ?

Le faon à la tête retournée sculpté sur ce propulseur en bois de renne, découvert à Bèdeilhac, en Ariège, est un thème spécifique aux Pyrénées françaises. On le retrouve sur plusieurs objets analogues.



DES OBJETS DE CULTE

Certains propulseurs décorés n'ont jamais servi à lancer des sagaies : ces objets avaient plutôt un usage culturel ou magique. Celui découvert au Mas d'Azil, en Ariège, avait été déposé dans un endroit écarté de la grotte ; un autre découvert à Bèdeilhac, aussi en Ariège, était recouvert d'un badigeon d'ocre et les yeux du faon sont incrustés de pierres. Le crochet ne porte pas les traces qu'aurait laissées une utilisation normale pendant la chasse.

Des éléments de parure marquent une identité régionale. Le plus caractéristique est un contour de tête de cheval, découpé dans la partie triangulaire de

l'os hyoïde du cheval (l'os du larynx) : plusieurs dizaines d'objets semblables ont été retrouvés dans différents sites. La production de rondelles perforées, découpées dans des omoplates d'animaux, est aussi abondante.

D'autres objets, tels le bâton percé (ou bâton de commandement), un manche aménagé sur la perche principale d'un bois de renne, avec une perforation à la jonction de la perche et de l'andouiller, sont communs à tous les Magdaléniens. Les groupes pyrénéens ont toutefois inventé des décors sculptés spécifiques. Enfin, plus de 1 000 plaquettes de schiste, gravées de figures animales et humaines, et de signes non figuratifs, ont été découvertes, à Enlène, en Ariège, mais aussi récemment en Espagne, dans des habitats et dans des sanctuaires.

Il y a 13 000 ans, le climat se réchauffe encore : les vallées se reboisent, et le cerf remplace progressivement le renne. De nouveaux bâtons sont façonnés en bois de cerf : leur extrémité est, sans ambiguïté, en forme de phallus. Ils sont en outre gravés : des cerfs très détaillés côtoient des animaux stylisés et des signes non figuratifs.

Les sites où ces objets et ces thèmes apparaissent sont répartis sur près de 700 kilomètres de long, dans des environnements divers. Dans les Cantabres, contrairement aux Pyrénées, les habitats sont proches de la mer, à une altitude de 100 à 200 mètres ; les hommes y exploitent à la fois le littoral et la montagne, et ils chassent plutôt le cerf et le bouquetin que le renne. Malgré cette diversité, les populations partageaient des thèmes artis-

tiques et des choix esthétiques : ceux-ci ne dépendent pas directement de l'environnement ni des conditions de vie. Ils témoignent de relations entre les groupes humains et de l'existence d'une tradition culturelle, plus riche que ne le laisse supposer la simple observation des modes de subsistance.

L'art préhistorique des Pyrénées, exposition au Musée des antiquités nationales de Saint-Germain-en-Laye, du 2 avril au 8 juillet 1996.

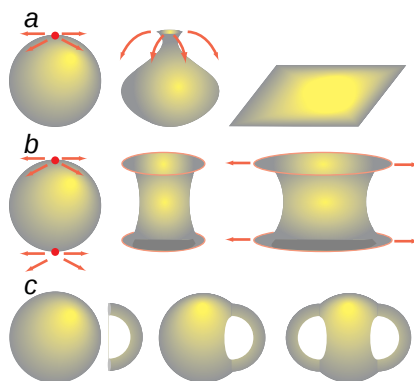
Surfaces minimales

L'ordinateur aide à les représenter et à prouver leur existence.

Lorsque l'on plonge des contours métalliques dans une solution savonneuse, des surfaces aux belles irisations apparaissent. Ces surfaces, définies et contraintes par leur contour, sont baptisées minimales car toute déformation locale augmente leur aire. En repoussant à l'infini certains de leurs contours, les mathématiciens envisagent des surfaces infinies. Grâce à des outils informatiques, Éric Boix, à l'École Polytechnique, et Meinhard Wohlgemuth, à l'Université d'Amherst (États-Unis), ont ajouté à la collection deux nouvelles surfaces minimales.

La recherche de surfaces minimales passe par une classification topologique. On classe toutes les surfaces en déformant une sphère à laquelle on ajoute des anses (le genre de la surface est égal au nombre des anses, la sphère étant de genre 0) et on ôte des points (le nombre de bouts).

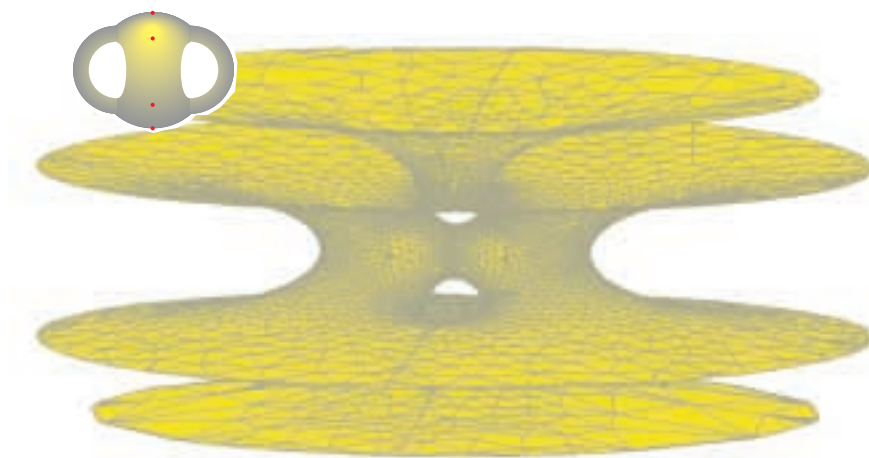
Ainsi le plan est l'équivalent topologique d'une sphère à laquelle on a enlevé un point. La caténoïde est la surface minimale qui s'appuie sur un contour constitué par deux cercles. En augmentant la taille des cercles à l'infini, on obtient la seule surface minimale topologiquement équivalente à une sphère privée de deux points.



Classification topologique des surfaces. Une sphère trouée est équivalente à un plan (a), une sphère percée de deux trous donne une caténoïde (b) dont les contours vont à l'infini, et le genre d'une surface est défini par le nombre d'anses ajoutées à une sphère (c) de genre 0.

Existe-t-il des surfaces minimales pour un genre et un nombre de bouts donnés? Parmi toutes les surfaces minimales, les mathématiciens se restreignent à celles qui ne se recoupent pas. Si pour certaines classes topologiques, le problème est résolu (sphères privées d'un ou deux bouts), le problème reste ouvert pour des sphères à plus grand nombre de bouts.

La vérification mathématique formelle du non-recoupement n'est possible que pour des surfaces simples. Pour des surfaces de genre élevé et avec quatre bouts, on doit conjecturer cette propriété de non-recoupement en calculant et en dessinant la surface avec l'outil graphique. En construisant les surfaces par triangulation, M. Wohlgemuth et E. Boix ont représenté deux nouvelles surfaces minimales à quatre bouts sans recoupement. À l'aide de ces visualisations, M. Wohlgemuth a alors démontré mathématiquement qu'elles ne se recoupent pas. □



Visualisation d'une des deux nouvelles surfaces minimales à quatre bouts. Elle est de genre deux (elle a deux anses) et possède quatre branches infinies, correspondant aux quatre points que l'on a ôté de la sphère de base.



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

CNRSFormation

au service de l'Entreprise

Méthodes d'optimisation : de la programmation linéaire aux algo- rithmes génétiques

Responsable scientifique :
Marc SCHËNAUER,
Chargé de Recherche
GIF sur Yvette (91)
du 3 au 7 juin 1996

Sur une nouvelle approche pour l'ana- lyse inélastique des structures

Responsable scientifique :
Joseph ZARKA
Directeur de Recherche
GIF sur Yvette (91)
du 10 au 14 juin 1996

Analyse des données quantitatives multidimensionnelles

Responsable scientifique :
Abdelkader ZIGHED
Professeur
VILLEURBANNE (69)
du 17 au 21 juin 1996

Conception optimisée intelligente des maté- riaux et des structures

Responsable scientifique :
Joseph ZARKA
Directeur de Recherche
GIF sur Yvette (91)
du 17 au 21 juin 1996

Catalogue, programmes
et inscriptions :

CNRSFormation

1 place Aristide Briand
92195 Meudon cedex

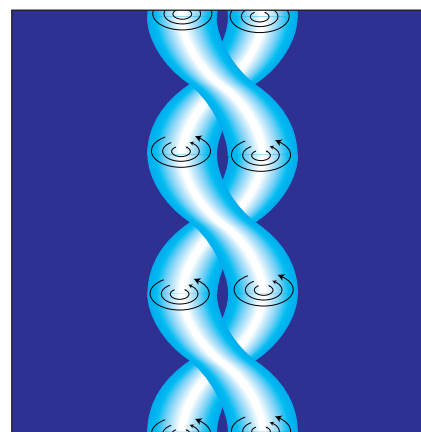
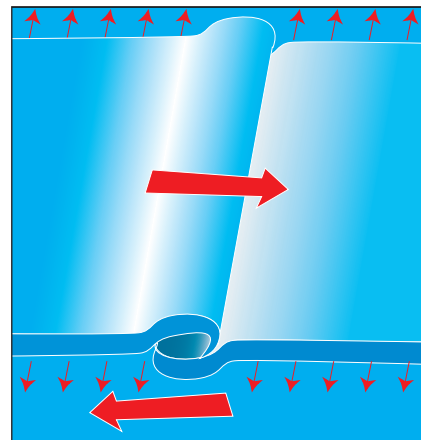
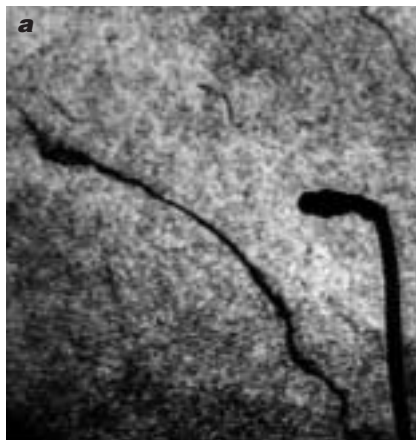
Tél. : (33.1) 45 07 56 72
Fax : (33.1) 45 07 56 84

Les tornades de la turbulence

Les physiciens isolent les structures de basse pression d'un écoulement turbulent.

La turbulence? Un des mystères lancinants de la physique contemporaine : il faut les ordinateurs les plus puissants pour calculer finement l'écoulement de fluide dans des canalisations simples, alors que les principes de base, les équations de la mécanique des fluides, sont établis depuis plus d'un siècle. À l'École normale supérieure, Olivier Cadot, Stéphane Douady et Yves Couder utilisent de petites bulles pour explorer les écoulements fortement tur-

bulents. Le physicien russe Andrei Kolmogorov est l'auteur d'une théorie statistique de la turbulence où il prévoyait que l'énergie injectée dans un écoulement nourrissait des structures (des tourbillons, par exemple) de plus en plus petites, jusqu'à ce que la viscosité dissipe les petites structures formées. Cette théorie prévoit remarquablement la répartition de l'énergie observée entre les différentes échelles du mouvement ; elle forme le cœur de la théorie actuelle de



Deux photographies d'un écoulement turbulent (à gauche). En raison de l'éclairage arrière, les bulles apparaissent en noir sur un fond clair. Le plus intense des filaments de bulles est observé lorsqu'il se forme (a) et lors de sa déstabilisation en triple hélice, moins d'un dixième de seconde après (b). On note la présence d'autres filaments moins longs et moins intenses. On voit à droite des photographies le capteur de pression, relié par un connecteur dont le diamètre est égal à trois millimètres. À droite, on a représenté la formation (en haut) et la destruction (en bas) des filaments.

la turbulence. Toutefois elle ne dit rien sur les structures spatiales de l'écoulement ni sur les mécanismes de transfert d'énergie entre les structures. D'autre part, les expérimentateurs avaient remarqué, depuis longtemps, l'intermittence de la turbulence, qui se caractérise par des bouffées violentes d'activité dans des régions localisées de l'espace. Cette intermittence est inexpliquée par la théorie de Kolmogorov.

DES EXPÉRIENCES AVEC DES BULLES

Expérimentalement on observe difficilement les structures caractéristiques de la turbulence. La superposition de mouvements incohérents à toutes les échelles n'est pas facile à concevoir, ni à voir. Cependant l'intérêt pour les structures turbulentes a été relancé par l'avènement des simulations sur ordinateur, qui permettent de voir et de revoir un écoulement simulé sous toutes les coutures. Une des grandeurs à laquelle les hydrodynamiciens s'intéressent le plus est la vorticité, qui est une mesure de la rotation des tourbillons sur eux-mêmes. Plusieurs simulations, depuis le travail de E. Siggia, à l'Université Cornell, ont montré que les régions où la vorticité est grande sont en forme de filaments : des tourbillons fins seraient concentrés dans les écoulements turbulents.

Ce sont ces structures que les physiciens de l'École normale supérieure ont voulu observer directement, dans un écoulement turbulent de laboratoire. Comme il n'existe aujourd'hui aucun moyen de visualiser la vorticité elle-même, ils se sont fondés sur les variations de pression associées : quand une baignoire se vide, un tourbillon intense se forme au-dessus de la bonde ; la zone déprimée, au cœur du tourbillon, révèle une diminution de la pression à cet endroit.

L'idée expérimentale était d'utiliser la migration de bulles. Dans de l'eau au repos, la pression hydrostatique est minimale à la surface : de petites bulles y migrent. Pour la même raison, dans un écoulement turbulent où la pression est hétérogène, les bulles migrent vers les régions de basse pression, qui sont ainsi spécifiquement marquées. C'est un procédé de visualisation classique des tourbillons stationnaires en hydrodynamique, mais dont on ne pensait pas qu'il fonctionnerait dans les écoulements violemment turbulents.

Dans les premières expériences de «coin de table», les bulles provenaient d'aspirine effervescente, placée dans un grand b cher muni de deux agitateurs. L'expérience s'est affinée : la turbulence est aujourd'hui crée dans un

cylindre de 30 litres d'eau. Deux batteurs contrarotatifs, à chaque extrémité du cylindre, transforment cet appareil en une sorte de gros mixeur, où des microbulles sont injectées.

La plupart des bulles suivent l'écoulement, et restent dispersées, mais très transitoirement, on les voit ici et là se concentrer dans des régions en forme de filaments ; ce sont là les régions de basse pression. Ces filaments révèlent une dynamique propre : assez rectilignes quand ils se forment, ils se déstabilisent rapidement en formant une hélice, puis explosent. Un grand tourbillon moins intense subsiste là où le filament a disparu. Cette grande structure contient de nombreux petits filaments secondaires résiduels.

Après avoir observé, il faut mesurer. Un petit quartz piézoélectrique permet de mesurer la pression en un point de l'écoulement. De telles mesures ont été faites à Lyon, dans l'équipe de Stéphane Fauve, et à Paris. Les fluctuations de la pression, en fonction du temps, ont un aspect particulier, asymétrique : vers les hautes pressions, elles ont la répartition gaussienne qui est classique pour les phénomènes aléatoires, mais vers les basses pressions, on observe la superposition de fluctuations ordinaires, gaussiennes, et de fluctuations extraordinaires, plus rares, mais parfois dix fois plus intenses.

L'observation simultanée de l'écoulement montre que ces dépressions sont dues au passage sur le capteur des filaments précédemment décrits. D'autres mesures (de vitesse, par exemple) confirment le diagnostic : il existe, au sein des écoulements turbulents, des structures violentes qui ressemblent à de petites tornades localisées.

Il reste à comprendre le rôle de ces structures. On soupçonnait, depuis longtemps, que, dans les écoulements turbulents, un « tirement de la vorticité» jouait un rôle dans le transfert d'énergie d'échelle en échelle. Les observations sur la dynamique de formation des filaments semblent montrer que des couches de cisaillement (c'est-à-dire des surfaces entre les deux côtés desquelles la vitesse du fluide varie notablement) se forment à la périphérie d'un gros tourbillon. Cette couche est étirée (voir la figure en haut à droite) et cet étirement amplifie la vorticité, par le même mécanisme que celui qui augmente la vitesse de rotation d'une patineuse qui rapproche les bras du corps. L'enroulement de ces surfaces crée les filaments. Ceux-ci sont instables et explosent pour redonner à la fois un grand tourbillon et beaucoup de petites structures. L'ensemble de ces phénomènes expliquerait au moins une partie de l'intermittence de la turbulence. □



POUR LA SCIENCE

VOUS INVITENT
  L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

Les impossibles en démographie humaine

avec
Hervé Lebras,
Directeur du Laboratoire
de démographie historique
EHESS - CNRS

LE SAMEDI 13 avril 1996
  15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

Tchernobyl : avenir incertain

DANIEL ROBEAU

Les effets sur l'environnement et la santé de cette catastrophe nucléaire, qui précipita la chute du régime communiste, restent difficiles à évaluer, ce qui alimente les débats entre alarmistes et optimistes.

L'explosion du réacteur numéro 4 de la centrale de Tchernobyl a bouleversé la vie des centaines de milliers de personnes qui vivent dans les territoires contaminés du Bélarus, de la Fédération de Russie et d'Ukraine. Les données historiques disponibles concernant les rejets des produits radioactifs entre le 26 avril et le 10 mai 1986, les mesures de la contamination des sols et des eaux permettent d'estimer les expositions aux rayonnements, passées, présentes et futures, de ces populations. Sur la base de ces données, les responsables politiques et administratifs des régions contaminées doivent répondre aux interrogations économiques, sanitaires et sociales des populations, tandis que les experts étudient les niveaux de contamination tolérables et les actions envisageables.

Le site de Tchernobyl

Les travaux réalisés dans les mois qui ont suivi l'explosion du réacteur ont confiné sommairement les produits radioactifs et limité le risque d'exposition aux rayonnements du personnel de la centrale. Ils ont aussi atténué la contamination immédiate des populations qui vivent à l'extérieur de la zone d'exclusion de 30 kilomètres de diamètre. Cette œuvre titanesque a été réalisée dans des conditions extrêmement difficiles par quelque 650 000 «liquidateurs» ; ceux-ci devaient également remettre en service les réacteurs non accidentés, notamment le réacteur numéro 3 contigu au réacteur 4.

Quelle est la situation dix ans après ? À la complexité d'une situation caractérisée par une dispersion

non maîtrisée des produits radioactifs s'ajoutent l'improvisation des premiers travaux de dégagement et la dispersion des responsabilités. Aussi beaucoup de zones d'ombre subsistent-elles, et un bilan complet de la situation est difficile à établir, de même qu'une analyse globale des risques et une hiérarchisation de ceux-ci par degré d'urgence et d'importance. Les projets de réhabilitation proposés jusqu'à présent n'ont pas bénéficié de bases suffisamment solides pour emporter l'adhésion. Aussi les points de vue alarmistes et optimistes sont-ils exacerbés.

Au moment de l'accident, le réacteur contenait 192 tonnes de combustible plus ou moins irradié. Une fraction du combustible a fondu et coulé sous forme de lave, dans le fond du bâtiment du réacteur ; une autre fraction est restée en place ou a été projetée aux divers niveaux des structures supérieures ; d'autres fragments ont été propulsés autour du bâtiment et sur les toits voisins ; une partie enfin, chauffée pendant l'explosion, a été expulsée sous forme de fines particules.

Douze tonnes de combustible ont été regroupées au pied du bâtiment, puis recouvertes de terre et de béton, constituant le «mur des pionniers», un talus bétonné de huit à dix mètres de haut sur 150 mètres de long, qui borde toute la face Sud de la salle des machines. Au Nord, une autre paroi, le «mur cascade», comporte trois grandes marches d'escalier creusées d'alvéoles ; les liquidateurs y ont entassé de multiples débris de l'explosion, et ce mur étaye les structures Nord du bâtiment, fortement ébranlées.

Ces deux «murs» contiennent une dizaine de tonnes de combustible irradié ; ce combustible est lessivé par les



1. LE RÉACTEUR 4 QUI A EXPLODÉ est visible à droite, le réacteur 3, à gauche, étant toujours en fonctionnement. Après l'explosion, le réacteur 4 a été recouvert d'un sarcophage qui confine les radio-isotopes les plus dangereux.

Le récit du drame

«C'était la fin du monde [...] Je n'en croyais pas mes yeux ; j'ai vu le réacteur détruit par l'explosion. J'étais le premier homme au monde à assister à un tel spectacle. En tant qu'ingénieur nucléaire, j'étais conscient de toutes les conséquences. C'était un enfer nucléaire. J'étais terrorisé.»

Le chef de section chargé de l'exploitation du réacteur qui explosa, il y a dix ans, à la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, est l'auteur de ces lignes apocalyptiques. L'explosion et l'incendie qui en résulta, projetèrent des débris radioactifs à travers une grande partie de l'Europe. Le chef de section, ainsi que plusieurs de ses collègues, ont été emprisonnés pour leur rôle dans la catastrophe ; ils ont toujours nié leur culpabilité.

Les enquêtes officielles ultérieures ont montré que l'équipe en place pendant la nuit du 25 avril 1986 n'était pas seule responsable. Parallèlement, les conséquences de la tragédie dépassent l'enjeu nucléaire et nous interrogent sur l'avenir de la civilisation technique. Avant l'explosion, Tchernobyl était une petite ville inconnue ; aujourd'hui, ce nom est devenu, dans la chronique du XX^e siècle, synonyme de la pire catastrophe écologique de tous les temps, aussi évocateur que «Stalingrad» ou «Bhopal». Les répercussions politiques de Tchernobyl ont accéléré l'effondrement de l'empire soviétique.

Il est vital que le monde comprenne à la fois les causes et les conséquences de ce désastre. Les événements qui ont provoqué l'explosion sont connus. Le réacteur numéro 4, un modèle RBMK de 1 000 mégawatts, chauffait, en fonctionnement normal, de la vapeur qui alimentait des turboalternateurs. La nuit de l'accident, les opérateurs examinaient l'autonomie des générateurs, pour voir pendant combien de temps ils tournaient sans apport

d'énergie. À cette fin, ils réduisirent l'énergie produite au sein du réacteur et bloquèrent le transfert de vapeur vers les turboalternateurs.

Malheureusement, un défaut de conception du RBMK-1 000 rendait son exploitation instable à bas régime. À bas régime, toute augmentation induite de la production de vapeur pouvait fortement accroître la production d'énergie au sein du réacteur. Comme cette énergie excédentaire n'était pas éliminée par la production de vapeur, le réacteur pouvait s'emballer. De surcroît, les opérateurs avaient désactivé les dispositifs de sécurité...

Le 26 avril, à 1 heure 23 minutes 40 secondes, un opérateur, s'apercevant du danger, appuya sur le bouton activant le système de protection automatique. Cette procédure visait à couper le réacteur, mais il était trop tard.

En trois secondes, la production d'énergie dans le cœur du réacteur monta à 100 fois son niveau maximal, et la température augmenta de façon vertigineuse. Deux explosions arrachèrent la plaque de métal de 2 000 tonnes qui recouvrait le sommet du réacteur et détruisirent le bâtiment. Le génie de la bouteille nucléaire était libéré.

Malgré les tentatives héroïques de maîtrise de l'incendie, les centaines de tonnes de graphite qui servaient de modérateur dans le réacteur se consumèrent pendant dix jours. Les gaz brûlants transportaient dans l'atmosphère des aérosols constitués de combustible et de produits de fission, les isotopes qui sont les sous-produits d'une exploitation normale. Poussés par les vents dominants, ils furent détectés jusqu'au Japon.

Yuri SCHERBAK
Ambassadeur d'Ukraine aux États-Unis

eaux de pluie qui s'infiltrèrent dans le sol et polluent les eaux souterraines.

Certains produits de fission, en particulier les iodes, se sont échappés au moment de l'explosion, mais les combustibles restant dans l'enceinte et dans les murs contiennent encore une importante fraction des produits les moins volatils, par exemple les deux tiers du césium 137. Ces produits radioactifs empêcheront de manipuler les débris sans protection épaisse avant plusieurs centaines d'années.

Les débris contiennent aussi la quasi-totalité des isotopes lourds, actinides et transuraniens, avec, en particulier, plusieurs centaines de kilogrammes de plutonium dont la durée de vie est de dizaines de milliers d'années. Contrairement à ce qu'on lit souvent, le césium est plus dangereux que le plutonium : ce dernier n'est nocif que par inhalation. À très long terme (plusieurs centaines d'années),

les produits lourds, essentiellement les émetteurs α , représenteront le risque majeur.

La majorité du combustible se présente sous forme de «lave», mélange fondu de combustible et d'éléments métalliques provenant des structures du cœur initial. À l'intérieur du réacteur, cette lave, initialement très dure, tend actuellement à se transformer en poudre très fine sous l'effet de l'humidité et de l'oxydation. Cette pulvérisation augmente les risques de déplacement de ces particules, par l'air ou par l'eau. Elle rend encore plus précaire le confinement actuel.

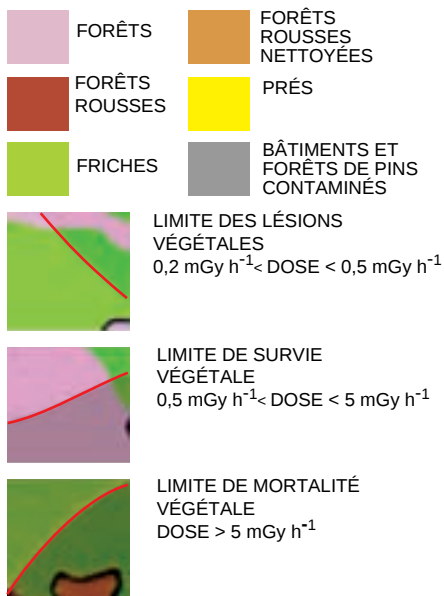
Écroulement du sarcophage et libération de poussières

Construit avec l'espoir qu'il tiendrait 20 ou 30 ans, le sarcophage construit autour du réacteur immédiatement après l'explosion se dégrade

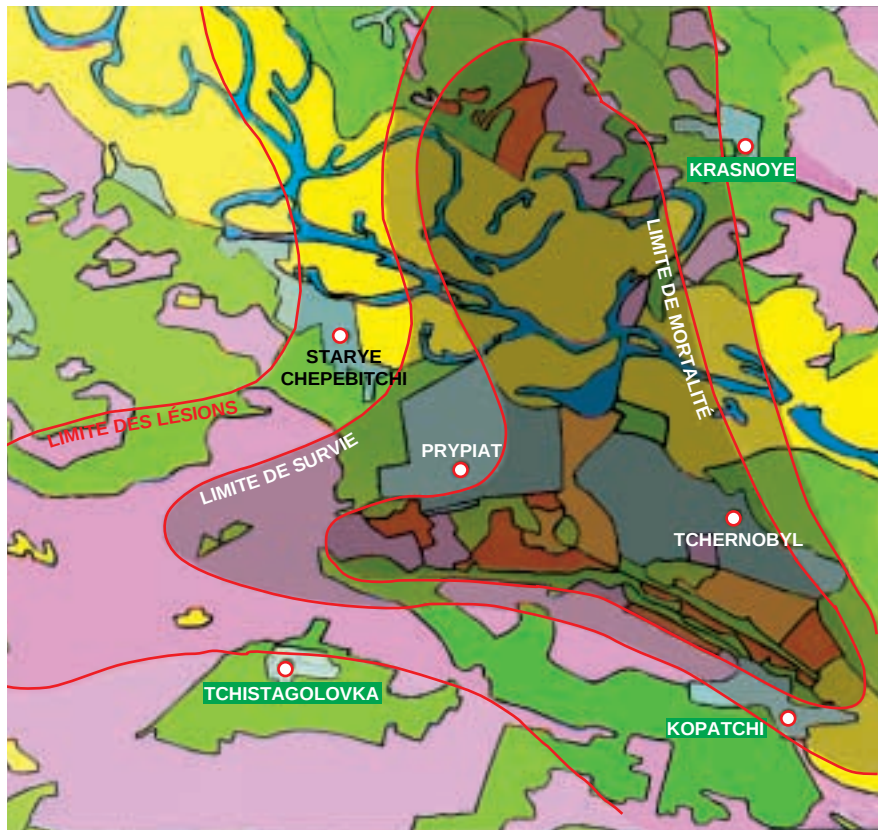
plus vite que prévu : il ne restera pas en l'état sur une telle période sans travaux notables. De grandes ouvertures ont été initialement ménagées entre les tôles de couverture, afin que la ventilation naturelle évacue les quelques centaines de kilowatts de puissance résiduelle émise par le combustible. Cette émission de chaleur est aujourd'hui négligeable, et la taille des ouvertures a été réduite, mais elles laissent entrer l'eau de pluie.

Le risque d'écroulement interne au sarcophage est permanent ; un dispositif de vaporisation d'eau, installé sous le toit, clarifie l'atmosphère et limiterait les émissions de poussière en cas d'effondrement.

Le danger de propagation des poussières a été évoqué par ceux qui réclament la construction rapide d'un nouveau sarcophage : sans nier sa nécessité, il faut remarquer que l'écroulement ne s'accompagnerait pas d'un



2. LIMITES DES ZONES À RISQUE pour la végétation autour de la centrale de Tchernobyl. Les forêts rousses ont été brûlées par les rayonnements. Dans la forêt rousse nettoyée, on a arraché les souches et nettoyé la litière.



dégagement énergétique comparable à l'explosion d'un réacteur. Le nuage de poussières ne s'élèverait que de quelques dizaines de mètres et retomberait à proximité. Un tel événement, très grave pour les exploitants du site, toucherait peu les populations.

Dans l'urgence des travaux de décontamination, de nombreux sites

de stockage de matériaux contaminés ont été constitués. D'un volume total d'un million de mètres cubes, leur activité totale est estimée à 14 000 téra-becquerels. Ces 800 sites sont des structures non sécurisées, contenant des matériaux contaminés provenant du réacteur.

Le bassin de refroidissement de la centrale nucléaire de Tchernobyl est un réservoir de 22,9 kilomètres carrés de superficie, contenant 100 millions de mètres cubes d'eau. Entre 1989 et 1995, la contamination annuelle moyenne du bassin de refroidissement a augmenté de 5 à 12 becquerels de césium 137 par litre et de 4,5 à 8,5 becquerels de strontium 90 par litre. Les charges radioactives totales des boues du bassin sont de 130 téra-becquerels de césium 137, 30 téra-becquerels de strontium 90 et 0,11 téra-becquerels de plutonium 238 et 239.

Situation radiologique de la zone d'exclusion

Dans la zone d'exclusion, évacuée en 1986, la contamination des terres est supérieure à 1 480 kilobecquerels de césium 137 par mètre carré. La zone englobe les deux villes de Prypiat et de Tchernobyl, ainsi que 74 hameaux ;

elle est principalement contaminée par le césium 137, le strontium 90 et des éléments transuraniens (plutonium, américium). Les flux de radioactivité vers l'extérieur de la zone d'exclusion sont surveillés, le plus important étant dû à l'écoulement des eaux de ruissellement, dont les rivières sont l'exutoire.

Ainsi, entre 1989 et 1995, les eaux de la rivière Prypiat ont charrié, en moyenne annuelle, dans le réservoir d'eau qui alimente la ville de Kiev, de 4,14 à 15,7 téra-becquerels de strontium 90 et de 2 à 4,6 téra-becquerels de césium 137. Entre 1986 et 1995, les contaminations moyennes des eaux de la rivière Prypiat ont été divisées par 2 000 pour le césium 137 et par 6 seulement pour le strontium 90 ; le strontium, plus soluble et plus mobile que le césium, est plus facilement entraîné par les eaux, notamment en cas de crue. La contamination des eaux du réservoir de Kiev diminue notablement, mais elle augmentera de nouveau en cas de grande crue.

Selon les dernières estimations, la radioactivité qui peut être drainée vers la rivière Prypiat par ruissellement des eaux est de 555 téra-becquerels de césium 137, de 370 téra-becquerels de strontium 90 et de 11,1 téra-becque-

UNITÉS DE MESURE

L'unité de mesure de la radioactivité est le becquerel (Bq), unité qui correspond à une désintégration par seconde, quel que soit le type de rayonnement émis. Un téra-becquerel (TBq) vaut 10^{12} Bq.

L'unité de mesure de la dose absorbée est le gray (Gy). Le gray correspond à la production d'un joule par interaction entre les rayonnements et un kilogramme de matière. Pour tenir compte du type de rayonnement, on multiplie la dose absorbée par un coefficient Q variant de 1 à 20. Cette dose s'exprime en sieverts ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{Q}$). Le coefficient Q varie de 1 pour les rayonnements γ à 20 pour les rayonnements α .

rels de plutonium. La contamination de l'eau potable des villes de Tchernobyl et de Prypiat par le strontium 90 ne dépasse pas 200 becquerels par mètre cube, soit au-dessous du niveau autorisé de contamination, égal à 20 becquerels par litre ; malheureusement, dans les puits des zones rurales, la contamination est cinq fois supérieure à celle des eaux dans les villes.

Les autres flux de radioactivité vers l'extérieur de la zone d'exclusion sont dus au transfert atmosphérique des poussières radioactives remises en suspension, aux migrations d'animaux et aux activités humaines. Ces voies sont négligeables comparées au transfert par les eaux de ruissellement, sauf à l'occasion des feux de forêts : un feu de 200 hectares de forêt entraîne la remise en suspension de près de 70 tonnes de cendres radioactives. Depuis l'accident, six feux importants se sont déclarés dans cette forêt morte.

La contamination radioactive de la zone d'exclusion est surveillée par 20 stations de mesure de la radioactivité des aérosols, 133 stations de prélèvement et de mesure des eaux de surface et souterraines. En outre, la radioactivité est surveillée mensuellement par des prélèvements d'aérosols atmosphériques, de dépôts de surface, d'eau et de sol. Les eaux souterraines ne sont polluées que sur une faible partie de la zone d'exclusion, mais très fortement à l'aplomb des zones de stockage temporaire. Les eaux qui circulent dans les déchets eux-mêmes ont une activité en strontium 90 de 100 000 à 100 millions de becquerels par litre. La contamination des eaux souterraines augmente, et le maximum est prévu dans 10 à 20 ans.

Durant les premiers jours qui ont suivi l'accident, les débits de dose près

du réacteur accidenté étaient de l'ordre d'un gray par heure. Ils sont aujourd'hui de l'ordre de quelques dixièmes de milligray par heure. La radioactivité des aérosols atmosphériques a décru régulièrement jusqu'en 1991, puis s'est stabilisée.

Outre la contamination des divers compartiments de l'environnement, les doses incorporées par les personnes vivant ou travaillant dans la zone d'exclusion indiquent la viabilité de cette zone. La dose moyenne annuelle des personnes travaillant dans la zone d'exclusion a diminué, entre 1990 et 1995, de six à un millisievert ; la limite acceptée est d'un millisievert pour les personnes du public et 20 dans un cadre professionnel.

En principe, la zone d'exclusion a été totalement évacuée. En fait, quelques centaines de personnes, généralement âgées, y vivent encore de leur propre production agricole, sans appliquer de contre-mesures. Cette population ne reçoit pas, d'après les informations officielles, une dose annuelle supérieure à un millisievert.

Après une irradiation aiguë en mai 1986, due au passage du nuage radioactif et au dépôt des radionucléides sur le sol, une large part de la faune et de la flore a récupéré ses fonctions essentielles dès que le débit de dose a diminué. Néanmoins, on observe des altérations aux niveaux cellulaire et moléculaire dans les organismes végétaux. L'environnement a été contaminé à une période de l'année où la nature, en pleine croissance est la plus sensible aux rayonnements. Les organes de reproduction des arbres sont particulièrement vulnérables aux rayonnements, et la relation entre les doses reçues par les arbres et les capacités de germination

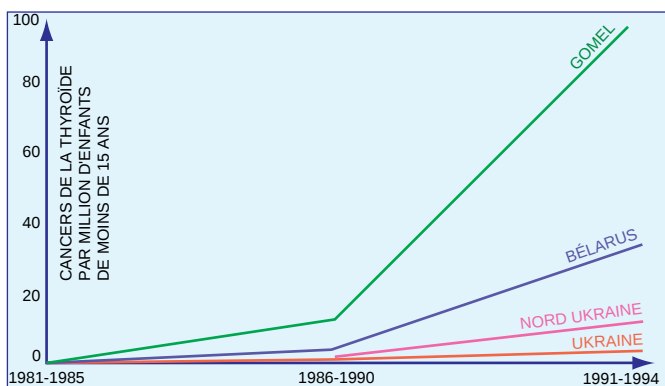
des graines est nette. Les conifères sont particulièrement fragiles.

Aux alentours du site, les rayonnements ont massivement détruit les pins et partiellement endommagé le feuillage supérieur des bouleaux, des aulnes et, plus généralement, des arbres à feuilles caduques. On appelle ces forêts, «forêts rousses». De 1988 à 1989, une partie des arbres de cette zone a retrouvé ses capacités de reproduction. Les botanistes ont noté des anomalies morphologiques et des anomalies de croissance chez les herbacés et les arbustes.

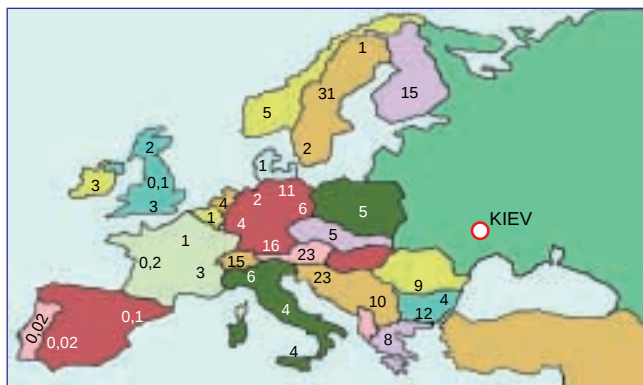
Dans le monde animal, on a observé un grand nombre d'altérations des processus physiologiques et biologiques ; de profondes modifications pathologiques, éventuellement mortelles, ont frappé les espèces dont l'habitat a été fortement contaminé, notamment les rongeurs. La fertilité des poissons vivant dans les lacs et la rivière Prypiat a diminué, leur taux de croissance et les processus de développement des cellules sexuelles ont été altérés. Chez différentes espèces de reptiles et d'amphibiens, le nombre d'aberrations cellulaires a augmenté. Les invertébrés, qui sont plus résistants aux rayonnements ionisants, ont toutefois été plus affectés, du fait de la plus forte contamination de leur niche écologique.

Contamination hors de la zone d'exclusion

L'inventaire calculé du cœur, à l'instant de l'accident, était de 25 millions de térabecquerels d'halogènes, dont 12,6 millions de térabecquerels d'iodes (ces produits dangereux résultent des réactions de fission dans le combustible nucléaire). Vingt à cinquante pour



3. INCIDENCE ANNUELLE MOYENNE du cancer de la thyroïde chez l'enfant en Bélarus, en Ukraine et à Gomel.



4. DÉPÔTS DE CÉSIUM 137 dans les pays d'Europe (mesurés en kilobecquerels par mètre carré).

cent des iodes ont été rejetés dans l'atmosphère. Les iodes, éléments volatils à vie courte, ont disparu par décroissance radioactive quelques mois après l'accident ; hélas, dans l'entremise, la radioactivité rejetée et la radiotoxicité des iodes sur la thyroïde ont entraîné des dommages sanitaires importants pour les populations. Une large part de la région du «Polessey» est maintenant classée en «réserve écologique et radiologique» et est réglementée par un décret limitant considérablement les activités humaines, notamment l'agriculture. Dans le sol, dix ans après l'accident, plus de 95 pour cent de l'activité totale est présente dans les dix premiers centimètres.

Environ 5 à 30 pour cent du césium et 50 à 90 pour cent du strontium présents dans le sol sont aujourd'hui disponibles pour les plantes. La libération du strontium par les particules chaudes devrait accroître cette disponibilité.

L'impact de la radioactivité sur l'homme résulte essentiellement de la radioactivité de la couche supérieure du sol. Cette présence est quantifiée

par la «demi-vie de présence» du radionucléide dans le sol, c'est-à-dire le temps nécessaire à une diminution de moitié de sa concentration initiale. Pour le césium 137, cette demi-vie est plus longue dans la couche supérieure du sol (24 à 27 ans), où le césium est piégé, que dans la couche plus profonde, au-delà de 5 à 8 centimètres (10 à 17 ans). Le strontium disparaît de la surface une à trois fois plus vite que le césium.

La forêt occupe environ 30 pour cent des sols contaminés et a joué le rôle de filtre dans l'interception des retombées, ce qui se traduit par une contamination accrue de 20 à 30 pour cent de la zone périphérique des forêts par rapport au centre ; 60 à 90 pour cent des retombées ont été interceptées par le feuillage, la moitié de l'activité retombant au sol au bout d'un mois. La litière est donc la partie la plus contaminée des écosystèmes forestiers : 45 à 90 pour cent des retombées y sont concentrées.

Actuellement, l'activité totale accumulée par la phytomasse représente six pour cent de la radioactivité totale

de la forêt. Les feuillus accumulent plus de radioactivité que les conifères. Les végétaux arbustifs et herbacés des écosystèmes forestiers se décontaminent de moitié en 15 ans.

La contamination des forêts a durement frappé l'économie forestière : 20 pour cent de la production de bois en Bélarus, qui dépasse les niveaux acceptables de contamination, est temporairement stockée avant emploi. Le bois de chauffage est le plus surveillé, car sa combustion concentre l'activité dans les cendres (d'un facteur 100). L'une des options proposées pour la valorisation des forêts contaminées est l'incinération dans des centrales de production d'énergie thermique ou des usines de transformation du bois en pâte à papier, le contrôle des cendres étant plus facile dans une installation industrielle.

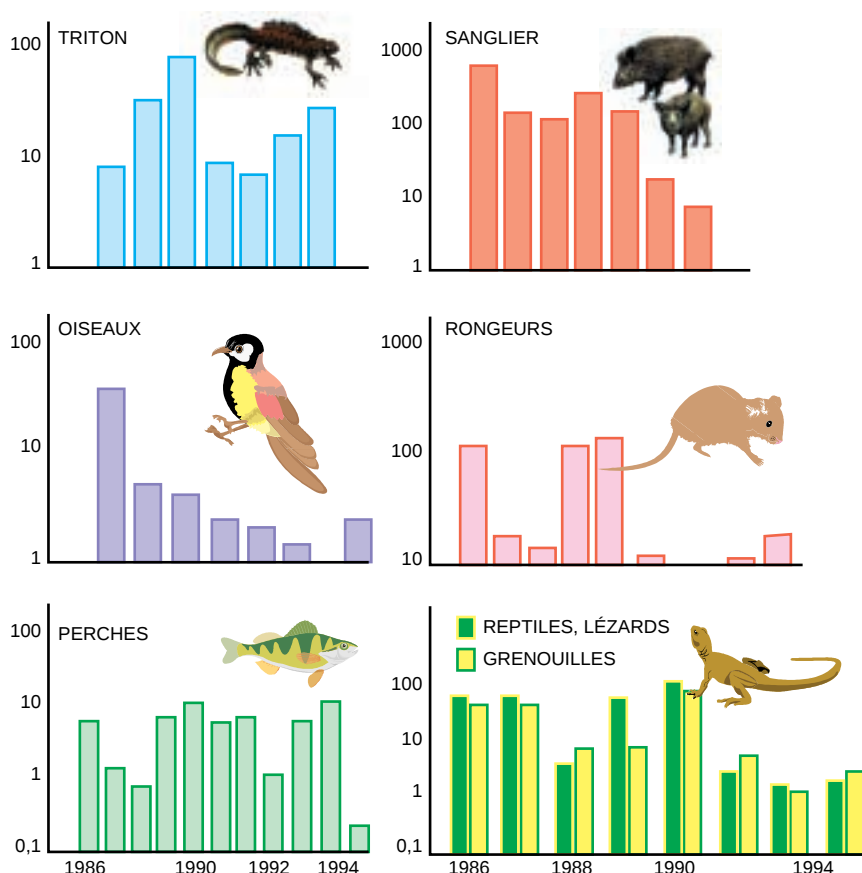
Doses aux populations

La dose prévue pour la période de 1996 à 2056 est deux à trois fois plus faible que la dose déjà reçue durant ces dix dernières années, la moitié de cette dose ayant été délivrée en 1986. Dans les zones les plus contaminées, les individus recevront 200 à 300 millisieverts au cours de leur vie, en plus de la dose due à l'irradiation naturelle.

La dose due à l'alimentation représente 60 pour cent de la dose totale entre 1986 et 1995. Cependant les 80 pour cent de la dose reçue dans les années à venir sera due à l'irradiation par le sol ; 20 pour cent seulement par l'alimentation. Une augmentation de la dose reçue a été observée ces dernières années chez les habitants des zones rurales : ce phénomène est principalement dû à la consommation de baies et de champignons, malgré leur contamination en césium 137 au-delà des niveaux permis. La contribution du strontium 90 à la dose provenant de l'alimentation est aujourd'hui négligeable. Entre 1986 et 1995, la contribution du plutonium à la dose a été de 25 microsieverts en moyenne.

Les mesures de décontamination

L'effort le plus important porte sur une réhabilitation de l'agriculture dans les territoires contaminés. Le premier objectif a été la production



5. CONTAMINATION DES DIFFÉRENTES ESPÈCES ANIMALES de la zone d'exclusion. Cette contamination est mesurée par la radioactivité γ artificielle en kilobecquerels par kilogramme. On a observé de fortes modifications pathologiques chez les rongeurs et les amphibiens.

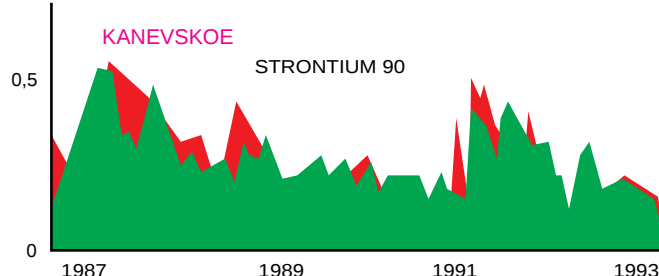
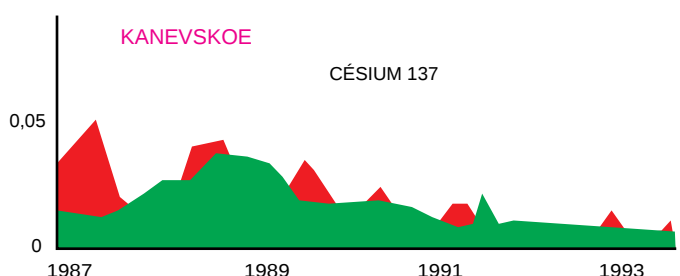
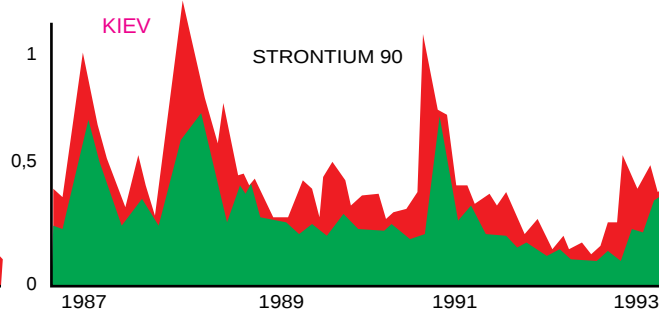
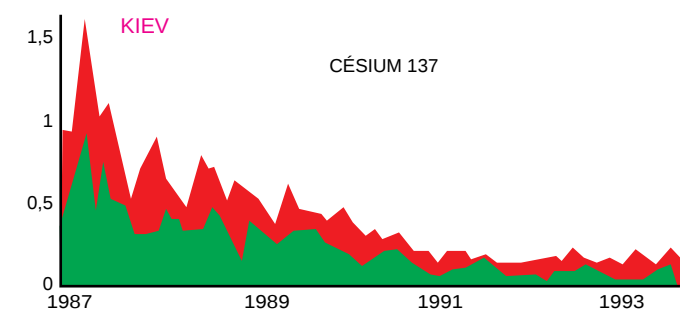
de produits agricoles au-dessous des niveaux admissibles de contamination. Les contre-mesures agronomiques, agrochimiques et l'amélioration des sols ont divisé le transfert du césium aux productions agricoles par un facteur 1,5 à 4 : chaulage des sols acides, application d'engrais potassium, labour profond et application d'engrais potassium. La contamination des produits animaux dépend du type d'alimentation, de l'affouragement, du type d'élevage,

du niveau de contamination du fourrage et du sol. L'alimentation des animaux avec du fourrage non contaminé, deux à sept mois avant l'abattage, permet la production de viande peu ou pas contaminée.

Depuis 1994, la contamination des productions agricoles a nettement diminué : 0,7 pour cent de la production de lait et quelques tonnes de viande seulement dépassent les limites tolérées. Aucune production en provenance de terres labourables (céréales,

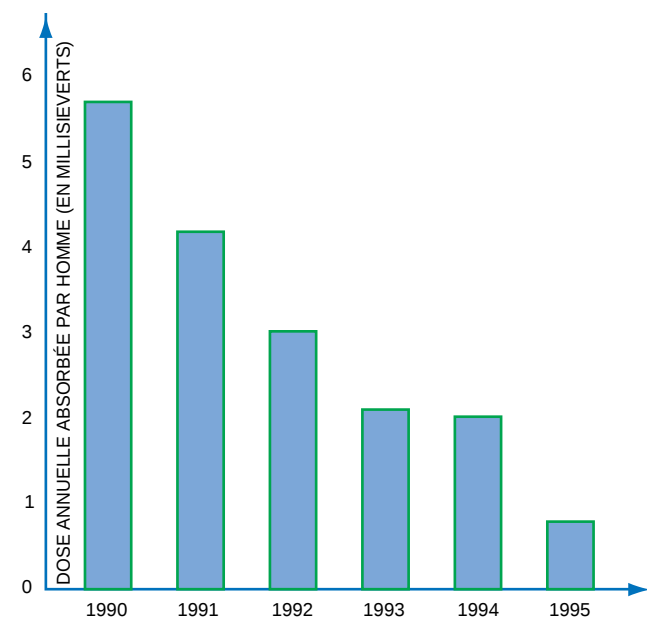
tubercules, racines) n'est supérieure aux limites tolérées.

Les contre-mesures qui ont été appliquées ont modifié très profondément les pratiques habituelles de cette zone agricole. Globalement, la production de fourrage a été augmentée, les pratiques zootechniques ont été modifiées (alimentation et stabulation du bétail), afin que les agriculteurs obtiennent des produits faiblement contaminés avant transformation.

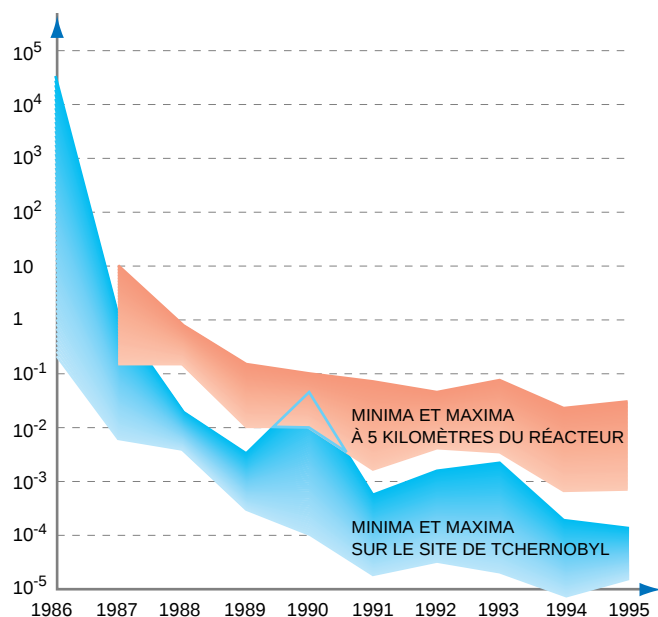


6. CONTAMINATION PAR LE CÉSIUM 137 ET LE STRONTIUM 90 des réservoirs d'eau de Kiev et de Kanevskoe, alimentés par le Dniepr et la Prypiat. Les aires en rouge indiquent l'activité des eaux à l'en-

trée des réservoirs, celles en vert l'activité des eaux en sortie. Les activités sont exprimées en becquerels par litre ; les niveaux temporaires admissibles sont de 370 becquerels par litre.



7. DOSES DÉLIVRÉES AUX POPULATIONS, en millisieverts par an, pour les travailleurs de la zone d'exclusion autour de Tchernobyl.



8. RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE due aux émetteurs β des aérosols atmosphériques entre 1986 et 1995.



9. CARTOGRAPHIE DES DOSES dans la zone de Tchernobyl. La zone d'exclusion de 30 kilomètres de diamètre est indiquée par le cercle rouge.

Qualité de la vie des populations

La catastrophe de Tchernobyl empêche les pratiques normales dans l'industrie et dans l'agriculture. Six à vingt pour cent des budgets nationaux des trois républiques ont été consacrés à la réhabilitation des territoires affectés par la catastrophe. Dans les territoires contaminés, la santé publique est le souci majeur : un système spécifique de sécurité sociale a été mis en place, et le suivi médical des populations y est intensif.

Ces mesures ont deux effets opposés : d'une part, elles contribuent à un meilleur état de santé, d'autre part, elles accroissent les inquiétudes des populations. L'état psychologique et social des individus vivant dans les territoires contaminés ou évacués en 1986 est caractérisé par une grande anxiété, une grande agressivité, une crainte de l'avenir et, finalement, un profond désespoir. Les évacuations et le relogement ont protégé les populations des rayonnements, mais ont créé des difficultés liées aux nouvelles conditions de vie et au déracinement. La situation démographique de ces territoires se dégrade : le taux de natalité et l'espérance de vie diminuent.

Des restrictions concernant la production et la consommation de produits alimentaires subsistent depuis mai 1986 dans les zones rurales les plus contaminées. Un approvisionnement de produits non contaminés a été mis en place, en particulier pour le lait, mais s'est révélé insuffisant pour les fruits, les légumes et le bois de chauffage. La consommation de produits contaminés n'a pas été supprimée.

Un problème corollaire est la difficulté, voire l'impossibilité, de trouver des marchés pour les denrées alimentaires produites dans les régions contaminées, même quand ces denrées respectent les normes sanitaires ; il en résulte une diminution du revenu des agriculteurs et une forte augmentation du chômage. L'aide apportée par l'État ne compense pas cette grave situation, et la méfiance de la population envers les pouvoirs publics est amplifiée.

Les effets sanitaires

Les pompiers, sauveteurs et employés de la centrale qui ont participé aux actions de secours le 26 avril 1986 et les jours suivants ont été les seuls à souffrir d'effets aigus des rayonnements. Parmi les 237 personnes for-

tement irradiées et hospitalisées, 28 sont mortes en quelques semaines. Leur mort résultait d'une combinaison des effets de l'irradiation et de brûlures radiologiques étendues, dues au dépôt de produits radioactifs sur la peau. Trois autres sauveteurs sont morts le premier jour, l'un de traumatismes dus à l'écroulement des structures du réacteur, un autre de crise cardiaque et le troisième de brûlures thermiques.

Peu de liquidateurs étaient munis de dosimètres. Les doses d'irradiation sont estimées à plus de 250 millisieverts pour dix pour cent d'entre eux. À titre de comparaison, la dose par irradiation naturelle sur la vie entière est d'environ 150 millisieverts. Compte tenu de ces doses, il n'est pas exclu qu'un excès de cancers apparaisse dans l'avenir. Il peut paraître technocratique de distinguer les cancers induits par la catastrophe et les cancers dits naturels, dont nul n'est à l'abri. Cette différenciation n'en est pas moins indispensable pour une bonne évaluation des risques et des niveaux de prévention souhaités.

Les cancers induits risquent d'apparaître dans les futures décennies, et persisteront jusqu'à l'extinction naturelle du groupe de liquidateurs, d'un âge moyen de 35 ans en 1986. Le nombre de cancers attribuables à Tchernobyl est actuellement de l'ordre de la dizaine, soit un excès d'environ cinq pour cent du fonds naturel de cancers.

Malgré de nombreux rapports faisant état de maladies diverses en nombre anormalement élevé chez les 650 000 liquidateurs, leur mortalité, telle qu'elle est attestée par les chiffres, est identique à celle de la population. Elle a d'ailleurs les mêmes causes, avec plus de la moitié des décès dus à des blessures et à des intoxications, un cinquième à des maladies cardio-vasculaires et moins d'un autre cinquième à des tumeurs malignes.

Entre 1986 et 1995, plus de 27 000 liquidateurs sont morts de causes «naturelles». Sur la base des doses reçues par les liquidateurs, le taux de cancers radio-induits à apparaître dans les décennies à venir peut raisonnablement être évalué à quelques centaines pour 100 000 liquidateurs, dont 15 000 ou plus mourront de cancers naturels. Pour l'ensemble des 650 000 liquidateurs, cela représenterait quelques milliers de cancers attribuables à Tchernobyl, parmi les 90 000

cancers à venir. Cette estimation, vraisemblablement maximaliste, car elle ne prend pas en compte une diminution de l'effet avec le temps, représente quelques pour-cent des cancers naturels. La population affectée par l'accident représente plus de deux millions de personnes en Bélarus, environ autant en Ukraine et un demi-million en Russie. Cette population comprend les évacués (au nombre de 200 000 environ), qui ont été exposés jusqu'au moment de leur relogement, et les personnes qui vivent sur des territoires contaminés.

Les cancers de la thyroïde

Le seul effet indubitable dû à Tchernobyl détecté jusqu'à présent est l'excès marqué de cancers de la thyroïde chez l'enfant. Il a été rapporté pour la première fois en 1990, puis il a augmenté au cours du temps. En 1995, 700 cancers de la thyroïde sont attribués à Tchernobyl. Ce nombre correspond à une multiplication du taux naturel (le cancer de la thyroïde est un cancer rare chez l'enfant) par 10 à 100 ou plus, suivant les régions. Par exemple, le taux normal (1981-1985) de 0,5 cancer par million d'enfants est passé à près de 100 dans la région de Gomel, en Bélarus, et à plus de 10 dans le Nord de l'Ukraine (1991-1994).

L'irradiation externe aiguë est un facteur de risque établi du cancer de la thyroïde, et le risque est plus élevé quand l'exposition s'est produite à un âge jeune. Ces cancers sont en majorité agressifs, s'accompagnant souvent de métastases ganglionnaires cervicales. En revanche, le rôle carcinogène de l'iode 131 seul n'est pas établi chez l'homme. On ignore encore le nombre de cancers résultant de l'une ou de l'autre cause, et à d'autres facteurs comme la carence alimentaire en iode, endémique dans les régions affectées par l'accident.

En se fondant sur un million d'enfants ayant reçu des doses thyroïdiennes susceptibles d'induire un cancer, le nombre total de cancers de la thyroïde à apparaître dans les 60 ans à venir serait d'environ 5 000. La mortalité en rapport serait d'environ 500. Cette projection ne tient pas compte d'une décroissance dans le temps, et l'on suppose que, chez les enfants, il peut exister, comme chez l'adulte, de très longs temps de latence.

Ce dernier point, contredit par les très courts temps d'apparition de la vague de cancers en 1990-1991, constitue un argument en faveur d'un avenir moins noir. Parmi les 115 000 évacués des premières semaines, certains ont reçu des doses significatives, représentant parfois plus de 50 fois la dose annuelle par irradiation naturelle. En résumé, le nombre de cancers induits par Tchernobyl sera inférieur à 1 000, et une estimation raisonnable aboutit à quelques centaines de cancers mortels dans les 60 prochaines années, à comparer avec les 17 000 cancers naturels attendus durant cette même période.

Dans l'ensemble des personnes directement concernées par l'accident, près de 300 000 vivent sur des territoires dont le niveau de contamination dépasse 555 kilobecquerels par mètre carré ; l'excès de cancers que l'on peut attendre des suites de Tchernobyl est inférieur à un pour cent du taux normal, soit environ quelques milliers pour plus de 40 000 cancers naturels. Jusqu'à présent, on n'a pas observé d'augmentation d'incidence de la leucémie ou des autres cancers. Si un excès de tels cancers existe, il est modéré. La démonstration d'une relation de causalité entre l'exposition aux rayonnements et diverses pathologies, l'artériosclérose et la trisomie 21, n'est pas établie.

Les traumatismes psychologiques

Il est reconnu que l'effet de l'accident sur la santé des populations est en rapport avec son impact socio-psychologique. De telles conséquences sont connues lors des catastrophes naturelles. Cet impact ne peut être isolé du contexte global de la détérioration profonde de la santé en ex-URSS depuis l'écroulement de cette dernière : ainsi l'espérance de vie est passée, chez les hommes, de 65 à 59 ans entre 1987 et 1993 ; le taux de mortalité est passé de 5 000 à près de 8 000 par million et par an entre 1990 et 1993, alors que le taux de cancers demeurait constant.

Si des problèmes de santé importants, en gravité et en fréquence, se dégagent dix années après la catastrophe, il reste de nombreuses inconnues. Une partie des données a été constituée dans des conditions méthodologiques médiocres, et les études

épidémiologiques ont été mises en place tardivement. Certains effets ont ainsi pu échapper à la détection, même sur une durée de dix ans. N'a-t-il pas fallu plusieurs dizaines d'années pour appréhender les conséquences sanitaires chez les survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki ? Ces dix dernières années, des efforts considérables ont été faits pour définir des principes reconnus internationalement pour la gestion de situations accidentelles et postaccidentelles dues aux rejets non maîtrisés de produits radioactifs dans l'environnement.

Tchernobyl 3

Le réacteur 3 de la centrale de Tchernobyl est adjacent au réacteur 4 détruit en avril 1986. Cette unité continue à produire six pour cent de l'énergie électrique de l'Ukraine ; sa localisation augmente le risque général lié à Tchernobyl.

La communauté internationale a demandé la fermeture de cette unité, fermeture maintenant programmée par le gouvernement ukrainien : le financement d'une nouvelle centrale a été accepté par le Groupement des sept pays les plus industrialisés. La centrale sera construite sur un autre site, et ne sera sans doute pas nucléaire.

Daniel ROBEAU est adjoint au directeur délégué à la protection de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire.

M. BALONOV, *The Chernobyl Papers*, Vol 1. *Doses to Soviet Populations and Early Health Effects Studies*, Steven Merwin, Michaël Balonov éditeurs.

Tchernobyl : cinq années difficiles, ministère de la Santé de la fédération de Russie, 1992.

A.R. SICH, *The Chernobyl Accident Revisited Source Term*, Massachusetts Institute of Technology, janvier 1994.

Tchernobyl, dix ans déjà. Impact radiologique et sanitaire, AEN / OCDE, novembre 1995.

Circonstances et conséquences de la pollution radioactive dans l'ancienne Union soviétique, IPSN / Mission Communication, 1995.

Rapport Tchernobyl 10 ans après, IPSN / Mission Communication, 1996.

Les variations passées du niveau des mers

JACQUES REY • RENÉ CUBAYNES

Les nouvelles méthodes d'analyse des couches sédimentaires nous révèlent les montées et les descentes du niveau de la mer au cours des temps géologiques.

Rien ne nous paraît plus immuable que le niveau moyen des mers, par rapport auquel nous définissons altitudes et profondeurs. Rien ne semble plus fixe que la zone côtière qui sépare la mer du continent. Pourtant, les roches et les fossiles témoignent des déplacements de la ligne de rivage dans les temps géologiques. La mer gagne sur la terre aux périodes dites de transgression marine : il y a 150 millions d'années, au Jurassique supérieur, presque tout le territoire français était noyé. Pendant les régressions marines, la mer recule, découvrant de vastes étendues terrestres.

Les variations du niveau marin sont-elles globales ou locales ? Quelles sont leur périodicité et leur amplitude ? Quelles sont les causes de ces variations ? Quelles en sont les répercussions climatiques, biologiques, économiques ?

Les géologues ont entrepris de retrouver, les témoignages de ces fluctuations du niveau océanique dans l'empilement des strates de sédiments. Les relations entre l'organisation des dépôts et les mouvements de montée et de descente du niveau des océans ont été décrits il y a une quinzaine d'années. Ce modèle a servi de base à des études systématiques, menées dans plusieurs bassins sédimentaires grâce à de nouvelles méthodes, telles que l'établissement de profils sismiques du sous-sol ou l'analyse statistique du contenu paléontologique des strates, qui permettent de déterminer les conditions environnementales de leur dépôt. Dans le bassin d'Aquitaine, au Portugal et au Maroc, nous avons ainsi reconstitué l'histoire des fluc-

tuations du niveau de la mer sur des périodes de quelques dizaines de millions d'années.

Les correspondances établies entre des variations du niveau marin en des points éloignés de la planète nous conduisent à rechercher des causes globales aux fluctuations observées. Les variations des paramètres orbitaux de la Terre et celles de l'activité tectonique semblent se conjuguer et régler un système chaotique où niveau des mers, climat, évolution des reliefs et accumulation sédimentaire interagissent. Nous avons montré que ce comportement chaotique est suivi par l'évolution des populations de foraminifères (des organismes marins unicellulaires) directement liée aux variations du niveau marin.

L'étude stratigraphique des variations du niveau marin a aussi des enjeux économiques. Ces fluctuations ont en effet permis la formation des gisements de pétrole : les périodes de haut niveau marin, associées à des climats chauds, sont propices au développement du plancton, dont la décomposition a produit le pétrole. Le repérage préalable des couches sédimentaires où des hydrocarbures se sont formés et de celles où ils peuvent être stockés intéresse donc les compagnies pétrolières au plus haut point.

Comment les sédiments se déposent-ils dans les zones littorales ? Il y a une quinzaine d'années, Peter Vail, alors géologue de la Société *Exxon*, a élaboré, avec ses collègues, un modèle qui relie l'organisation géométrique des couches sédimentaires aux variations du niveau marin. Une séquence

de dépôt comprend trois étapes : bas niveau marin, transgression et haut niveau marin. Un groupe de couches sédimentaires à la géométrie caractéristique correspond à chacune de ces étapes. La quatrième étape, la baisse du niveau marin, est généralement rapide et les dépôts correspondants ne sont pas distingués de ceux de la période de bas niveau marin.

Volume d'eau et forme de la Terre

Dans les périodes de stabilité de l'écorce terrestre, les déplacements de la ligne de rivage résultent de la combinaison de trois facteurs : les variations de la quantité d'eau liquide contenue dans la mer (qui dépend du volume des calottes glaciaires), l'apport plus ou moins important de sédiments, qui fait plus ou moins avancer la côte vers la mer, et l'abaissement progressif des fonds marins sous le poids de ces sédiments. Les variations de ces trois paramètres se répercutent aussi sur l'épaisseur de la tranche d'eau, espace disponible pour la sédimentation. Les fluctuations de la quantité d'eau et les variations de la quantité de sédiments sont primordiales. L'abaissement du fond marin, qui augmente en permanence l'espace disponible, est plus régulier, mais aussi plus ou moins fort selon la localisation géographique : il n'intervient que secondairement en accentuant ou en atténuant les conséquences des variations de la quantité d'eau et du dépôt sédimentaire.

Contrairement aux idées reçues et aux observations rapides des affleu-