

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 créée dans un

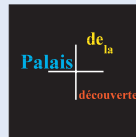
cylindre de 30 litres d'eau. Deux batteurs contrarotatifs, à chaque extrémité du cylindre, transforment cet appareil en une sorte de gros mixeur, où des microbulles sont injectées.

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