

quantités de neige peuvent ainsi dévaler par le chemin le plus direct jusque dans les vallées situées en contrebas. L'énergie cinétique ainsi libérée produit de dangereuses avalanches qui emportent, écrasent ou recouvrent tout sur leur passage.

On peut diviser les avalanches en deux catégories selon le type et l'état de la neige: les avalanches sèches ou poudreuses, et les avalanches mouillées ou de fond. Les premières sont dangereuses à cause de l'effet de souffle qu'elles engendrent et les secondes à cause de leur simple poids dû à l'humidité de la neige qui fait qu'elles écrasent tout en dévalant la pente souvent à grande vitesse, charriant parfois des parties du sous-sol.

Des situations particulièrement dangereuses peuvent ainsi survenir lorsque la neige s'accumule sur de vastes flancs de montagne sous l'effet du vent, car elle forme alors souvent une plaque dont la cohésion demeure superficielle, à la manière d'un rideau suspendu reposant sur une base susceptible de produire un effet de roulement à billes. Si une rupture survient dans cette plaque très mince (par exemple, à la suite du passage d'un skieur en travers de la pente) ou si, pour une raison quelconque, elle se déchire (par exemple, sous l'effet de son propre poids), toute la nappe de neige peut alors glisser vers le bas, se transformant habituellement en avalanche en cours de route.

Une énorme pression s'accumule parfois à l'intérieur de l'avalanche qui est alors capable d'emporter ou d'écraser des locomotives ou des immeubles entiers comme de simples jouets. Les êtres humains surpris dans un tel enfer n'ont de toute évidence que très peu de chances de survivre: ceux qui ne sont pas broyés meurent en général d'asphyxie ou de froid. Il ne faut donc pas s'étonner que, même lorsqu'on les retrouve immédiatement, 20% environ des personnes emportées par des avalanches ne peuvent être ranimées.

La topographie et la végétation du lieu font en sorte que les masses de neige en mouvement suivent une trajectoire prédéterminée jusqu'au fond de la vallée. Tous ceux qui vivent dans ces régions le savent d'expérience et par tradition et se tiennent donc à l'écart de ces zones dangereuses en hiver.

Autrefois, la seule façon d'échapper à ce genre de danger était d'éviter de s'y exposer. Les fermes et les villages étaient bâtis dans les endroits protégés des avalanches par des accidents du terrain ou que l'on savait de longue date éloignés de toute trajectoire connue d'avalanche. Les gens évitaient même complètement les régions montagneuses pendant les périodes dangereuses.

Les forêts situées en haut des versants montagneux offrent une bonne protection contre ce type de catastrophe naturelle, car elles soutiennent les masses de neige dans les zones menacées et peuvent ralentir, stopper ou détourner des avalanches qui se sont déjà déclenchées, pourvu qu'elles n'aient pas atteint une trop grande vitesse.

L'histoire des régions montagneuses n'en est pas moins ponctuée de catastrophes à répétition causées par les avalanches qui ont entraîné et continuent d'entraîner des pertes humaines et matérielles considérables. D'une part, on sous-estime souvent la vitesse et l'inertie des avalanches. D'autre part, les avalanches empruntent parfois des trajectoires qui, même après des siècles d'expérience, n'avaient jamais été considérées comme des couloirs d'avalanche. Certaines conditions météorologiques défavorables, alliées à une qualité de neige particulière et à l'état du sol sous-jacent (végétation endommagée, érosion ou ameublissement du sol par suite de fortes pluies), créent parfois des conditions qui peuvent conduire à une nouvelle «catastrophe du siècle».

Le risque d'avalanche que présente une région dépend non seulement des conditions météorologiques, mais aussi et surtout de la stabilité de la couverture neigeuse et du fait qu'elle est ou non située dans une zone habituelle d'écoulement ou d'arrivée d'avalanche. Des cartes spéciales indiquent les zones où des avalanches ont déjà eu lieu ou risquent de se produire compte tenu

des caractéristiques topographiques, notamment les couloirs et les points d'arrivée d'avalanches fréquentes. Il est interdit de construire dans les zones à haut risque.

Ces précautions ne suffisent toutefois plus aujourd'hui. En effet, malgré l'interdiction de construire dans certaines régions et malgré l'abondance des informations sur les dangers des avalanches, les gens sont toujours attirés en grand nombre par le pittoresque des régions montagneuses, si bien que l'on construit de plus en plus même dans des zones pourtant réputées dangereuses. A ces infractions ou à ces contournements de la réglementation viennent s'ajouter les milliers de touristes qui affluent à la montagne en hiver pour y faire du sport et s'y adonner à d'autres activités de loisir, dans les régions mêmes où les avalanches sont pratiquement préprogrammées. L'idéal pour le ski, c'est une pente raide, libre d'obstacles et recouverte d'un manteau neigeux assez épais: si ces conditions sont idéales pour le skieur, elles le sont aussi pour les avalanches.

Or, si ces risques ne peuvent être évités ou sont, dans une certaine mesure, consciemment assumés comme un «effet secondaire» indésirable du plaisir que l'on prend à faire du sport, il est quand même nécessaire de se préparer à faire face au danger.

Pour accroître les chances de survie des personnes prisonnières d'une avalanche, il est essentiel de mettre sur pied des services de sauvetage efficaces, d'installer des téléphones d'urgence près des zones à risque et de tenir à jour, à l'intention des autorités et des touristes, l'information sur les conditions observées dans les zones à risque. La mise en place de systèmes d'alerte avancée et de services de sauvetage dotés d'une organisation sans faille et du meilleur équipement possible peut accroître considérablement les chances de survie des personnes enfouies sous des avalanches et réduire l'ampleur des dommages qu'elles entraînent.

Les mesures de protection

Diverses méthodes de protection contre les avalanches ont été mises au point et éprouvées partout dans le monde, comme les services d'alerte transfrontalière, les barrages et même le déclenchement artificiel d'avalanches au moyen d'explosifs ou de coups de feu tirés au-dessus des champs de neige.

La stabilité de la couverture neigeuse est essentiellement déterminée par le rapport de la contrainte mécanique et de la densité. Cette stabilité peut varier très sensiblement selon le type de contrainte (compression, traction, cisaillement) dans une zone géographique donnée (partie du champ neigeux où peut prendre naissance une avalanche). Le relief, l'ensoleillement, les vents, la température et les perturbations locales de la structure du manteau neigeux (du fait de la présence de rochers, de skieurs, de chasse-neige ou d'autres véhicules) peuvent également avoir une incidence sur la stabilité. Celle-ci peut donc être réduite par une intervention locale délibérée, comme le dynamitage, ou accrue par l'installation d'ouvrages de soutènement ou de barrières. Ces mesures, qui peuvent être permanentes ou temporaires, sont les deux principales défenses utilisées contre les avalanches.

Au nombre des mesures de protection permanente figurent divers ouvrages efficaces et durables, tels que les râteliers aménagés dans les zones de départ d'avalanche, les parois de déviation ou les cairns de freinage dans la zone d'écoulement et les murs d'arrêt dans la zone d'arrivée. Le but des défenses temporaires est de rendre sûres et de stabiliser les zones où une avalanche risque de se produire, en déclenchant volontairement des avalanches de moindre envergure pour éliminer par sections les masses de neige dangereuses.

Les râteliers augmentent artificiellement la stabilité du manteau neigeux dans les zones à risque d'avalanche. Les virevents, qui empêchent le vent d'accumuler de nouvelles masses de neige dans la zone avalancheuse, peuvent accroître l'effet des râteliers. Les parois de déviation et les cairns de freinage aménagés sur la

trajectoire de l'avalanche, de même que les murs d'arrêt placés dans la zone d'arrivée, peuvent détourner ou ralentir la masse de neige dans sa course et raccourcir la distance d'écoulement. Les râteliers sont des ouvrages fixés au sol plus ou moins perpendiculairement à la pente, capables d'offrir une résistance suffisante à la masse de neige en mouvement; ils doivent être assez hauts pour atteindre la surface de la neige. Habituellement disposés en plusieurs rangées, ils doivent être installés partout où des avalanches pourraient, en présence de diverses conditions météorologiques, menacer la zone à protéger. Des années d'observation et de mesure de la neige sont nécessaires pour déterminer avec précision l'emplacement, la structure et les dimensions de ces ouvrages. Les rangées de râteliers doivent aussi avoir une certaine perméabilité pour laisser passer les avalanches mineures et les glissements de surface, en les empêchant de prendre de l'ampleur ou de causer des dommages. Si la perméabilité est insuffisante, la neige risque de s'empiler derrière les barrières et de permettre ainsi aux avalanches suivantes de passer librement par-dessus sans être stoppées, entraînant avec elles d'autres masses de neige.

Contrairement aux structures permanentes que sont les râteliers, les défenses temporaires permettent elles aussi de réduire le danger pendant un certain temps. Il s'agit en gros de déclencher des avalanches par des moyens artificiels: on élimine ainsi les masses de neige dangereuses des zones avalanches en déclenchant délibérément, sous surveillance, un certain nombre de petites avalanches à des moments choisis. De telles mesures ont pour effet d'augmenter considérablement la stabilité de la couverture neigeuse qui reste sur le site avalancheux et de réduire, au moins pendant un certain temps, le risque d'avalanches plus grosses et plus dangereuses en période critique.

L'ampleur de ces avalanches provoquées ne peut cependant être déterminée d'avance avec un grand degré de précision. Pour réduire au maximum le risque d'accidents, toute la région touchée par l'avalanche artificielle, depuis la zone de départ jusqu'à la zone d'arrivée, devrait être évacuée et fermée et faire l'objet d'un contrôle avant le déclenchement.

Les applications possibles de ces deux méthodes de réduction des risques sont fondamentalement différentes. En général, il est préférable de recourir aux défenses permanentes pour protéger les zones qu'il est impossible ou difficile d'évacuer ou de fermer, ou lorsque les avalanches contrôlées risquent de toucher des bâtiments ou des forêts. Les défenses temporaires conviennent par contre très bien à la protection des routes, des pistes ou des pentes de ski qu'il est facile de fermer pour de courtes périodes.

Les diverses méthodes de déclenchement artificiel des avalanches comportent plusieurs opérations qui présentent certains risques et qui, par-dessus tout, exigent la mise en place de mesures de protection supplémentaires pour les personnes affectées à l'exécution des travaux. L'essentiel est de provoquer une rupture de la couverture neigeuse au moyen d'une secousse artificielle (détonation), afin d'entraîner un glissement.

Les explosifs conviennent particulièrement bien au déclenchement d'avalanches sur les versants escarpés. Il est habituellement possible de détacher de petites sections de neige espacées les unes des autres et d'éviter ainsi de provoquer des avalanches majeures qui s'écoulent sur de longues distances et peuvent être extrêmement destructrices. L'idéal serait de pouvoir mener ces déclenchements à tout moment et par tous les temps, mais cela n'est pas toujours faisable. Les méthodes de déclenchement à l'explosif diffèrent considérablement selon les moyens utilisés pour atteindre la zone cible.

Les zones sujettes aux avalanches peuvent être bombardées à la grenade ou à la roquette à partir de positions sûres, mais ces interventions ne permettent d'obtenir le résultat voulu que dans 20 à 30% des cas. En effet, d'une part, il est pratiquement impossible de déterminer et de frapper avec précision la meilleure zone

cible à distance et, d'autre part, la couverture neigeuse absorbe le choc de l'explosion. Il arrive aussi que les obus n'exploient pas.

Le déclenchement à l'aide d'explosifs commerciaux installés directement dans la zone où les avalanches sont susceptibles de se produire a généralement plus de succès. La meilleure méthode consiste à installer l'explosif sur des pieux ou sur des câbles suspendus au-dessus de la section du champ de neige où l'on veut déclencher l'avalanche et à le faire détoner à une hauteur de 1,5 à 3 m au-dessus de la couverture neigeuse.

En plus du bombardement des flancs de la montagne, trois autres méthodes ont été mises au point pour amener l'explosif jusqu'à l'endroit choisi pour déclencher l'avalanche:

- câbles transporteurs d'explosifs (CaTEEx);
- déclenchement à la main;
- largage ou abaissement de la charge explosive à partir d'un hélicoptère.

Le transport par câble aérien est la méthode à la fois la plus précise et la plus sûre. À l'aide d'un petit câble transporteur, la charge explosive est amenée au-dessus de la section de la couverture neigeuse où l'on veut déclencher l'avalanche. En contrôlant bien le câble et en se servant de divers signaux et marqueurs, on arrive à positionner la charge à l'endroit précis où l'on sait d'expérience qu'elle sera la plus efficace et à la faire exploser directement au-dessus. Pour obtenir les meilleurs résultats, il faut que la détonation se produise à la bonne hauteur au-dessus de la couverture neigeuse. Comme le câble transporteur passe généralement trop haut au-dessus du sol, on doit installer un dispositif d'abaissement pour descendre la charge jusqu'à la hauteur voulue. Il s'agit habituellement d'un treuil permettant d'abaisser un filin auquel la charge a été fixée. Grâce à ces câbles transporteurs, on peut déclencher des explosions à partir d'une position sûre, même lorsque la visibilité est mauvaise, de jour comme de nuit.

Vu ses bons résultats et ses coûts de production relativement peu élevés, cette méthode est largement employée dans toutes les régions alpines. On doit cependant presque partout détenir un permis pour l'utiliser. En 1988, des fabricants et des utilisateurs de câbles transporteurs d'explosifs, de même que des représentants des administrations des régions alpines de l'Autriche, de la Bavière et de la Suisse se sont rencontrés pour partager leur expérience en la matière. Toutes les informations recueillies à cette occasion ont été résumées dans des brochures et ont servi à l'élaboration de réglementations ayant force obligatoire. Ces documents contiennent les normes de sécurité technique relatives aux équipements et installations, de même que les instructions pour l'exécution des opérations en toute sécurité. Ainsi, lorsqu'elle prépare la charge explosive et utilise l'équipement prévu à cet effet, l'équipe de dynamitage doit pouvoir se déplacer sans encombre autour des divers appareils de câblage et commandes. Il faut aussi prévoir des sentiers sûrs et faciles d'accès permettant à l'équipe de quitter le site le plus vite possible en cas d'urgence. Il faut en outre avoir accès en toute sécurité aux tréteaux et aux stations du câble porteur. Pour prévenir tout raté à l'explosion, deux amorces et deux détonateurs doivent être utilisés pour chaque charge.

Souvent employé autrefois, le dynamitage à la main est une deuxième façon de provoquer des avalanches. Le dynamiteur doit alors escalader la montagne jusqu'à l'endroit du déclenchement. Une fois sur place, il peut fixer la charge explosive à des piquets plantés dans la neige ou, plus souvent, la lancer vers un point situé en contrebas qu'il sait d'expérience être particulièrement sensible. Habituellement, on exige que le dynamiteur soit relié par un filin à ses coéquipiers pendant toute la durée de l'opération. Mais, quel que soit le soin apporté par l'équipe de dynamitage à l'opération, les risques de chute ou la possibilité de rencontrer une avalanche en chemin ne peuvent être éliminés

étant donné que l'intervention demande souvent de longues ascensions, parfois par mauvais temps. A cause de ces dangers, cette méthode, elle aussi soumise à des règles de sécurité, est rarement utilisée de nos jours.

Le déclenchement par hélicoptère est une troisième méthode dont on se sert depuis de nombreuses années, dans les régions alpines et ailleurs, pour provoquer des avalanches. Vu les risques élevés qu'elle fait courir à l'équipage de l'appareil, on n'y a recours la plupart du temps qu'en cas d'absolue nécessité, pour éviter un danger grave et imminent, lorsqu'on ne peut procéder autrement sans encourir de risques encore plus grands. Comme cette méthode soulève en outre certains problèmes d'ordre juridique liés à l'emploi d'un aéronef, les autorités alpines, en collaboration avec les organismes de réglementation de l'aviation, les institutions et les autorités responsables de la sécurité et de la santé au travail et les spécialistes, ont formulé des directives particulières régissant le déclenchement des avalanches à partir d'hélicoptères. Ces directives prennent en compte non seulement la réglementation sur les explosifs et les consignes de sécurité, mais aussi les compétences physiques et techniques requises des personnes à qui l'on confie ce genre d'opérations.

Pour déclencher une avalanche à partir d'un hélicoptère, on peut soit abaisser la charge au-dessus de la couverture neigeuse à l'aide d'un filin, puis la faire exploser, soit la laisser tomber après l'avoir amorcée. Les hélicoptères doivent être spécialement adaptés pour ce genre d'opérations et bénéficier d'un permis approprié. En ce qui concerne la sécurité des opérations à bord de l'appareil, il doit y avoir une stricte division des tâches entre le pilote et le technicien en explosifs. La charge doit être correctement préparée et la longueur de l'amorce choisie en fonction de la technique employée (abaissement ou largage de la charge). Pour plus de sûreté, il faut aussi utiliser deux détonateurs et deux amorces, comme dans les autres méthodes. En règle générale, chaque charge contient entre 5 et 10 kg d'explosifs. Plusieurs charges peuvent être abaissées ou larguées l'une après l'autre au cours du même vol. Les détonations doivent être observées de visu pour s'assurer que toutes les charges ont bien sauté.

Toutes ces méthodes de dynamitage nécessitent l'utilisation d'explosifs spéciaux, efficaces par temps froid et peu sensibles aux influences mécaniques. Les personnes affectées à ces opérations doivent avoir reçu une formation spéciale et posséder l'expérience requise.

Les défenses temporaires et permanentes contre les avalanches ont été conçues à l'origine pour des usages très différents. Les onéreuses barrières permanentes ont surtout été construites pour protéger les villages et les bâtiments contre les grosses avalanches. Les dispositifs de protection temporaires servaient presque exclusivement au départ à protéger les routes, les domaines skiables et les équipements touristiques faciles à fermer. De nos jours, la tendance est à la combinaison des deux méthodes. Pour établir le programme de sécurité le plus efficace dans une région donnée, il faut analyser en détail les conditions locales et choisir la méthode qui offrira la meilleure protection possible.

● LE TRANSPORT DES MATIÈRES DANGEREUSES: LES PRODUITS CHIMIQUES ET LES MATIÈRES RADIOACTIVES

Donald M. Campbell

L'industrie et l'économie sont tributaires de nombreuses matières dangereuses qui sont transportées par route, par rail, par eau,

par air ou par pipeline entre leur point de fabrication et celui de leur utilisation, avant d'aboutir à leur point d'élimination. La grande majorité de ces matières atteignent leur destination sans encombre et en toute sécurité. L'industrie pétrolière fournit un bon exemple de l'ampleur du problème. Au Royaume-Uni, quelque 100 millions de tonnes de produits pétroliers sont acheminés par pipeline, par rail, par route et par eau. Près de 10% des travailleurs de l'industrie chimique de ce pays sont employés dans le réseau de distribution correspondant (transport et stockage).

Une matière dangereuse peut être définie comme une «substance ou une matière dont on sait qu'elle peut présenter un risque inacceptable pour la santé, la sécurité ou la propriété lorsqu'elle est transportée». La notion de «risque inacceptable» couvre un large spectre de considérations relatives à la santé, à l'incendie et à l'environnement. Les matières visées comprennent les explosifs, les gaz inflammables, les gaz toxiques, les liquides inflammables et hautement inflammables, les solides inflammables, les matières qui deviennent dangereuses au contact de l'eau, les matières comburantes, les matières toxiques ainsi que les matières corrosives et, enfin, les matières radioactives.

Les risques que présentent ces matières résultent directement de leur déversement, de leur inflammation, etc. Transportées par rail ou par route, elles peuvent provoquer des accidents majeurs susceptibles de toucher aussi bien les travailleurs que la population en général. Elles présentent également des dangers au chargement et au déchargement, de même qu'au cours de leur transport. La population exposée est donc celle qui vit à proximité des routes ou des voies ferrées qu'elles empruntent ou qui circule dans les véhicules ou les trains susceptibles d'être impliqués dans un accident majeur. Les zones à risque englobent aussi les points d'arrêt temporaire, comme les gares de triage et les aires de stationnement des camions. Sur mer, les risques sont associés aux manœuvres des navires qui entrent ou sortent des ports et y chargent ou déchargent leur cargaison; d'autres risques découlent également du cabotage et de la navigation dans les détroits et les eaux intérieures.

Au nombre des incidents qui peuvent se produire dans le cadre du transport, que ce soit pendant le transit ou sur le site d'installations fixes, on mentionnera l'auto-échauffement chimique incontrôlé, les déversements, les fuites, les dégagements de vapeurs ou de gaz, les incendies et les explosions. Deux des principaux facteurs d'incidents sont les collisions et les incendies. Dans le cas des camions-citernes, les fuites provenant des vannes et de surremplisages sont une autre cause de déversement. En général, tant pour les véhicules routiers que pour les véhicules ferroviaires, les incendies causés par une collision sont beaucoup moins fréquents que les autres. Les incidents liés au transport peuvent se produire aussi bien dans des zones rurales que dans des zones urbaines, industrielles ou résidentielles, et concerner des véhicules ou des trains, surveillés ou non. Il est rare qu'une collision soit la cause première de l'incident.

Le personnel d'intervention devrait être conscient des risques d'exposition et de contamination liés aux substances toxiques en cas d'accidents impliquant des chemins de fer, des gares de triage, des véhicules routiers, des terminaux de marchandises, des navires (de haute mer et de navigation intérieure) et des docks. Les pipelines (tant ceux des réseaux de distribution longue distance que ceux des réseaux locaux) peuvent aussi être dangereux s'ils sont endommagés ou s'ils fuient, que l'avarie se produise ou non en même temps qu'un autre incident. Les accidents survenant en cours de transport sont souvent plus dangereux que ceux qui arrivent sur le site d'installations fixes. On ignore parfois à quelles matières on a affaire; les panneaux de mise en garde peuvent être masqués parce que le véhicule s'est renversé ou à cause de la fumée ou de la présence de débris; les personnes en mesure de donner des renseignements pertinents sont parfois absentes ou ont

Etude de cas: transport de matières dangereuses

Un camion-citerne articulé transportant environ 22 000 litres de toluène circulait sur une grande artère qui traverse Cleveland, au Royaume-Uni, lorsqu'une voiture se mit en travers de son chemin. En manœuvrant pour l'éviter, le chauffeur fit capoter son véhicule. Les couvercles des cinq compartiments de la citerne s'ouvrirent et le toluène se répandit sur la chaussée, où il s'enflamma en provoquant un incendie en nappe. Cinq voitures qui circulaient en sens inverse furent prises dans les flammes, mais tous les occupants purent s'échapper.

Cinq minutes après avoir été appelés, les sapeurs-pompiers étaient sur les lieux. Le liquide en flammes avait pénétré dans les égouts et le feu s'était déjà propagé sur près de 400 m. Le plan d'intervention du comté fut aussitôt déclenché, tandis que les services sociaux et les transports publics étaient placés en état d'alerte pour le cas où une évacuation serait décidée. Les sapeurs-pompiers s'employèrent d'abord à éteindre les voitures en feu et à secourir leurs occupants. Ils se mirent ensuite à la recherche d'une prise d'eau appropriée. Un membre de l'équipe de sécurité de la société de produits chimiques arriva alors sur les lieux pour coordonner l'intervention avec les commandants des services de police et des sapeurs-pompiers. Des employés des services d'ambulance, de la commission d'hygiène environnementale et de la régie des eaux se trouvaient également sur place. Après consultation, on décida de laisser le toluène brûler plutôt que de tenter de l'éteindre au risque de provoquer des émissions de vapeurs chimiques. Pendant quatre heures, les policiers diffusèrent des mises en garde par les radios nationale et locale, demandant aux gens de rester chez eux et de fermer les fenêtres. La route fut interdite d'accès pendant huit heures. Une fois le niveau de toluène redescendu au-dessous de celui des couvercles dans la citerne, on éteignit le feu et récupéra les résidus de toluène. L'incident fut déclaré clos treize heures environ après l'accident initial.

Les risques étaient considérables à la fois pour la population (du fait du rayonnement thermique), pour l'environnement (du fait de la pollution de l'air, du sol et de l'eau) et pour l'économie (du fait des perturbations de la circulation). Le plan d'intervention prévu par la société de transport a été mis en œuvre dans les quinze minutes qui ont suivi l'accident et cinq personnes se sont immédiatement rendues sur les lieux. De leur côté, les autorités du comté possédaient un plan d'intervention hors site qu'elles ont, elles aussi, mis en œuvre immédiatement par le biais d'un centre de contrôle ad hoc réunissant la police et les sapeurs-pompiers. On a procédé au mesurage des concentrations, sans toutefois établir de prévisions sur la dispersion du produit en cause. L'intervention a mobilisé des moyens importants. Une cinquantaine de sapeurs-pompiers, avec l'aide de dix engins, se sont principalement employés à combattre le feu, à nettoyer les lieux et à contenir le déversement. Plus de quarante policiers ont été affectés à la circulation, à l'information de la population, à la sécurité et aux communications avec les médias. Les services de santé ont dépêché sur les lieux deux ambulances et deux assistants médicaux. L'administration locale a mis à contribution ses services d'hygiène environnementale et de transport, ainsi que ses services sociaux. La population a été tenue au courant au moyen de haut-parleurs, de messages diffusés à la radio et par le bouche-à-oreille. L'information mettait l'accent sur la conduite à tenir et, notamment, sur la nécessité de se mettre à l'abri à l'intérieur des habitations.

Deux personnes ont été admises à l'hôpital — un passant et un employé de la compagnie, tous deux blessés lors de l'accident. L'air a été pollué, mais la contamination du sol et de l'eau est restée limitée. Sur le plan économique, les dommages causés à la route ont été considérables et la circulation grandement perturbée, mais on n'a perdu ni récolte, ni bétail, ni production. Plusieurs leçons ont été tirées de l'événement. Le recours rapide aux données du système Chemdata et la présence sur place d'un expert technique de la société de transport se sont révélés fort utiles et ont permis de prendre immédiatement les mesures qui s'imposaient. On a pu aussi constater combien il est important de coordonner les déclarations à la presse. On a vu, enfin, qu'il faut toujours tenir compte de l'impact environnemental de la lutte contre l'incendie: en effet, si le feu avait été combattu dès le début de l'incident, un volume considérable de liquide contaminé (eau utilisée pour éteindre le feu et toluène) aurait pu pénétrer dans les égouts, dans les réserves d'eau et dans le sol.

péri dans l'accident. Le nombre des personnes exposées dépend de la densité démographique sur le lieu de l'accident, du moment de la journée (le jour ou la nuit), de la proportion de personnes qui se trouvent à l'intérieur et à l'extérieur, ainsi que de la proportion de celles qui peuvent être considérées comme particulièrement vulnérables. En plus de la population normalement présente sur les lieux, les équipes d'intervention courent également un risque. Ces personnels constituent d'ailleurs souvent une part importante des victimes lors d'accidents survenant pendant le transport de matières dangereuses.

Entre 1971 et 1990, soit sur une période de 20 ans, une quinzaine de personnes sont mortes dans des accidents de la route mettant en cause des produits chimiques dangereux au Royaume-Uni, comparativement à une moyenne annuelle de 5 000 victimes pour l'ensemble des accidents d'automobile. Il n'en reste pas moins qu'une quantité minimale de marchandises dangereuses peut causer des dommages considérables. En voici quelques exemples provenant de divers pays:

- Un avion s'est écrasé près de Boston, aux Etats-Unis, à cause d'une fuite d'acide nitrique.
- Plus de 200 personnes ont péri lorsqu'un camion-citerne de propylène a explosé sur un terrain de camping en Espagne.
- Lors d'un accident ferroviaire impliquant 22 wagons de produits chimiques à Mississauga, au Canada, un wagon-citerne contenant 90 tonnes de chlore s'est éventré, causant une explosion et un grave incendie. Personne n'a été tué, mais quelque 250 000 personnes ont dû être évacuées.
- Un accident de train survenu le long d'une autoroute à Eccles, au Royaume-Uni, a fait 3 morts et 68 blessés; heureusement, le

grave incendie de produits pétroliers qui s'en est suivi n'a fait aucune autre victime.

- A Herrborn, en Allemagne, un chauffeur a perdu la maîtrise de son camion-citerne d'essence, incendiant une grande partie de la ville.
- A Peterborough, au Royaume-Uni, l'explosion d'un véhicule qui transportait des explosifs a fait un mort et a presque entièrement détruit un centre industriel.
- L'explosion d'un camion-citerne d'essence à Bangkok, en Thaïlande, a fait un grand nombre de victimes.

Ce sont les gaz et les liquides inflammables qui sont à l'origine du plus grand nombre d'incidents graves (compte tenu en partie du volume transporté), suivis par les gaz et les fumées toxiques (y compris les produits de combustion).

Voici quelques données sur les transports routiers provenant d'études menées au Royaume-Uni:

- fréquence des accidents au cours du transport de matières dangereuses: $0,12 \times 10^{-6}/\text{km}$;
- fréquence des rejets au cours du transport de matières dangereuses: $0,027 \times 10^{-6}/\text{km}$;
- probabilité de rejet lors d'un accident de la route: 3,3%.

Ces données sont sans doute loin de rendre compte de tous les incidents mettant en cause des véhicules qui transportent des matières dangereuses. Par ailleurs, chaque accident survenant au cours du transport routier de ces matières présente ses propres caractéristiques.

De nombreux accords internationaux régissent le transport des matières potentiellement dangereuses:

Le règlement de transport des matières radioactives de 1996 de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA, 1996). Ce règlement établit des normes de sécurité assurant un niveau de contrôle acceptable des risques d'irradiation auxquels sont exposés les personnes, les biens et l'environnement du fait du transport des matières radioactives.

La convention internationale de 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS 74). Cette convention définit les normes de sûreté essentielles pour tous les navires à passagers et les navires de charge, y compris ceux qui transportent des matières dangereuses en vrac.

La convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution des eaux de la mer par les hydrocarbures, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif (MARPOL 73/78). Cette convention vise la prévention de la pollution par les hydrocarbures, les substances liquides nocives en vrac, les substances nuisibles transportées par mer en colis (y compris conteneurs, citernes mobiles et véhicules routiers ou ferroviaires). Elle est renforcée par le Code maritime international des marchandises dangereuses (Code IMDG).

Il existe un important corpus de règlements internationaux concernant le transport des marchandises dangereuses par air, par rail, par route ou par mer (incorporés aux législations nationales dans de nombreux pays). La plupart se fondent sur les normes prônées par l'Organisation des Nations Unies (ONU) et portent sur les principes d'identification, d'étiquetage, de prévention et de contrôle. Le Comité d'experts en matière de transport des marchandises dangereuses de l'ONU a rédigé des *Recommandations relatives au transport des marchandises dangereuses* à l'intention des gouvernements et des organisations internationales qui s'intéressent à la question. Ces recommandations portent, entre autres, sur les principes de la classification et la définition des classes, l'énumération des marchandises dangereuses, les exigences générales en matière d'emballage, les méthodes d'épreuve, le marquage, l'étiquetage et le placardage, ainsi que sur les documents de transport. Rassemblées dans un recueil appelé «Livre orange» («Orange Book»), elles n'ont pas force de loi, mais forment la base de toutes les réglementations internationales élaborées par diverses organisations internationales parmi lesquelles on peut citer:

- l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI): *Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses* (Tis);
- l'Organisation maritime internationale (OMI): *Code maritime international des marchandises dangereuses* (Code IMDG);
- la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU): *Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route* (ADR);
- l'Organisation des transports internationaux ferroviaires (OTIF): *Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses* (RID).

Que ce soit au niveau du transport ou des installations fixes, il est impérieux de dresser des plans détaillés pour intervenir en cas d'accident majeur impliquant des substances dangereuses et pour en atténuer les effets. Cette tâche est loin d'être simple et, cela, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le lieu de l'accident n'est pas connu d'avance, ce qui exige de la souplesse dans la planification, et les substances en cause ne le sont pas davantage. Selon la nature de l'accident, plusieurs produits peuvent se mélanger sur les lieux, causant d'énormes problèmes aux services d'intervention. L'accident peut aussi se produire dans les lieux les plus variés: région très urbanisée, région rurale éloignée, zone fortement industrialisée ou commerciale. Un autre facteur à prendre en considération est la population de passage qui, sans le savoir, peut être impliquée dans un incident à cause des embouteillages créés sur la voie publique ou de l'arrêt des trains, en cas d'accident ferroviaire.

Il est donc nécessaire d'élaborer des plans d'intervention aux échelons local et national. Ces plans doivent allier clarté, souplesse et simplicité. Comme de graves accidents de transport peuvent se produire dans une multitude d'endroits, les plans doivent couvrir tous les lieux possibles. Et pour qu'ils soient efficaces à tout moment, dans les régions rurales isolées comme dans les zones urbaines fortement peuplées, toutes les organisations participantes doivent pouvoir intervenir en disposant de la latitude voulue, tout en se conformant aux grands principes de la stratégie globale.

Les premiers intervenants arrivés sur place devraient recueillir le plus d'informations possible pour tenter de cerner les risques que présente la situation. L'intervention sera déterminée par la nature de l'accident (déversement, incendie, rejet de substances toxiques ou combinaison de ces possibilités). Les services d'intervention devraient connaître les systèmes d'étiquetage nationaux et internationaux servant à identifier les véhicules transportant des substances dangereuses et des marchandises dangereuses emballées; ils devraient en outre avoir accès à l'une ou l'autre des nombreuses bases de données nationales et internationales pouvant aider à définir le danger et les problèmes qui en découlent.

Il est capital de maîtriser rapidement la situation. La chaîne de commandement doit être clairement établie. Ainsi, au cours d'une même opération, le commandement peut passer des services de secours aux services de police, puis aux pouvoirs publics de la région touchée. Le plan doit permettre de déterminer les effets de l'accident sur la population (celle qui travaille ou réside dans la zone potentiellement touchée comme celle qui ne fait qu'y passer). Les spécialistes de la santé publique doivent être mobilisés pour donner des conseils tant sur la gestion immédiate de l'incident que sur ses effets directs et indirects (par le biais de la chaîne alimentaire) à long terme. Les points de contact auprès desquels on peut se renseigner sur la pollution des cours d'eau et autres sites et sur les effets des conditions météorologiques sur le déplacement des nuages de gaz doivent aussi être identifiés. Le plan doit en outre prévoir une éventuelle évacuation. Les options proposées doivent toutefois demeurer souples, car il faut tenir compte de tout un éventail de coûts/avantages, tant du point de vue de la gestion de l'incident que de celui de la santé publique. Les dispositions adoptées doivent énoncer clairement la politique à suivre en ce qui concerne l'information des médias et les mesures prises pour atténuer les répercussions de l'incident. L'information diffusée doit être exacte et pertinente; les porte-parole doivent savoir exactement où en est l'intervention et avoir accès aux spécialistes pour répondre aux questions techniques. De mauvaises relations avec les médias peuvent nuire à la gestion de la crise et susciter des commentaires négatifs et parfois injustifiés. Enfin, tout plan doit prévoir un nombre suffisant d'exercices théoriques et pratiques pour permettre aux différents acteurs d'évaluer leurs points forts et leurs points faibles, tant personnels qu'organisationnels.

Malgré l'abondance des publications sur les déversements de produits chimiques, seuls quelques ouvrages décrivent les conséquences écologiques de ces incidents. La plupart des travaux sont des études de cas. Les descriptions des déversements qui ont eu lieu mettent l'accent sur la santé humaine et les problèmes de sécurité et restent vagues sur leurs conséquences écologiques. Il faut savoir que les substances chimiques pénètrent dans l'environnement surtout en phase liquide. Il est très rare que des accidents ayant des répercussions écologiques touchent aussi immédiatement les êtres humains, et leurs effets sur l'environnement ne sont généralement pas causés par les mêmes substances chimiques ni par les mêmes voies d'entrée.

Diverses mesures de contrôle ont été mises en place pour prévenir les risques que présente le transport des matières dangereuses pour la santé et la vie humaines, notamment: réglementation des quantités transportées, orientation et contrôle des moyens de

transport, établissement d'itinéraires particuliers, réglementation des points de correspondance et de rassemblement ainsi que des zones situées à proximité. La recherche devrait maintenant mettre l'accent sur les critères de risque, la quantification des risques et les équivalences de risque. La Direction de la sécurité et de la santé du Royaume-Uni (United Kingdom Health and Safety Executive) a créé une base de données sur les risques d'accidents majeurs (MHIDAS) impliquant des substances chimiques dans le monde entier. Cette base de données contient actuellement des informations sur plus de 6 000 incidents.

● LES ACCIDENTS RADIOLOGIQUES

Pierre Verger et Denis Winter

La description, les sources, les modalités de survenue

Les accidents radiologiques peuvent avoir trois origines, en dehors du transport de produits radioactifs:

- l'utilisation des réactions nucléaires à des fins de production d'énergie, de fabrication d'armes ou de recherche;
- l'utilisation industrielle de sources de rayonnements (gamma-graphie, irradiation);
- l'utilisation de sources radioactives en médecine (dans un but diagnostique ou thérapeutique) et dans la recherche.

Il existe deux types de situations accidentelles pouvant toucher des populations différentes, selon qu'un rejet ou la dispersion de radionucléides dans l'environnement se produit ou non.

La contamination de l'environnement entraîne un risque d'exposition du public dont l'importance et la durée dépendent de la quantité et des caractéristiques des radionucléides rejetés (demi-vie, propriétés physico-chimiques) (voir tableau 39.18). Elle survient lors de la rupture des barrières interposées entre l'environnement et les radioéléments, à la suite d'accidents sur des installations nucléaires ou mettant en jeu des sources industrielles ou médicales. En l'absence de rejet, l'exposition reste circonscrite, dans la majorité des cas, aux travailleurs présents sur les installations ou manipulant les appareils ou des substances radioactives. Ces accidents se rencontrent aussi bien dans les installations nucléaires que dans les autres domaines d'utilisation des radioéléments (industrie, médecine, recherche).

Qu'il s'agisse des travailleurs ou du public, il existe différents modes d'exposition qui peuvent être associés: l'irradiation externe, l'irradiation interne et la contamination de la peau ou de plaies.

L'irradiation externe se produit lorsqu'un individu reçoit les rayonnements d'une source radioactive située à l'extérieur de l'organisme. La source peut être ponctuelle (source de téléthérapie ou d'irradiation) ou diffuse (nuage et dépôts radioactifs d'un accident) (voir figure 39.5). L'irradiation peut être locale, quand seule une partie du corps a été exposée, ou encore globale, lorsque l'ensemble de l'organisme est irradié.

L'irradiation interne est consécutive à l'incorporation de substances radioactives dans l'organisme (voir figure 39.5). L'incorporation peut résulter de l'inhalation de particules radioactives en suspension dans l'air (par exemple, césium 137, iode 131 présents dans le nuage de Tchernobyl). Elle peut aussi se faire par ingestion de corps radioactifs passés dans la chaîne alimentaire. Par exemple, l'iode 131 se concentre dans le lait. Selon les caractéristiques des radionucléides, l'irradiation interne peut toucher l'organisme entier ou des organes particuliers. Par exemple, le césium 137 diffuse dans l'ensemble des tissus de façon homogène tandis que l'iode 131 se concentre dans la thyroïde et le strontium 90 dans les os.

Enfin, la contamination de la peau ou d'une plaie se produit lorsque des corps radioactifs sont en contact direct avec celles-ci.

Les accidents d'installations nucléaires

Les installations nucléaires comprennent les centrales nucléaires (réacteurs de puissance), les réacteurs expérimentaux, les installations du cycle du combustible nucléaire (usines de fabrication de combustible ou de retraitement du combustible irradié) et, enfin, les laboratoires de recherche. Dans le domaine militaire, il existe des réacteurs de production de plutonium et des réacteurs «embarqués» de propulsion de navires ou de sous-marins nucléaires.

Les centrales nucléaires

Pour produire de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire, il faut récupérer, sous forme de chaleur, l'énergie libérée par la fission des atomes. Schématiquement, une centrale nucléaire est constituée: 1) d'un cœur contenant le combustible (en général, 80 à 120 t d'oxyde d'uranium pour les réacteurs à eau sous pression) dans lequel a lieu la réaction de fission; 2) de circuits transportant la chaleur grâce à un fluide caloporteur; 3) d'une installation, similaire aux installations non nucléaires de production d'électricité, qui transforme cette chaleur en électricité.

Le risque majeur de ces installations est la survenue d'événements pouvant induire des augmentations de puissance massives et brutales, provoquer la fusion du cœur et entraîner le rejet de produits radioactifs hors de l'installation. Deux accidents sont survenus dans le passé, l'un à Three Mile Island (1979, Pennsylvanie, Etats-Unis), l'autre à Tchernobyl (1986, Ukraine). Tous deux correspondaient à une fusion plus ou moins importante du cœur du réacteur.

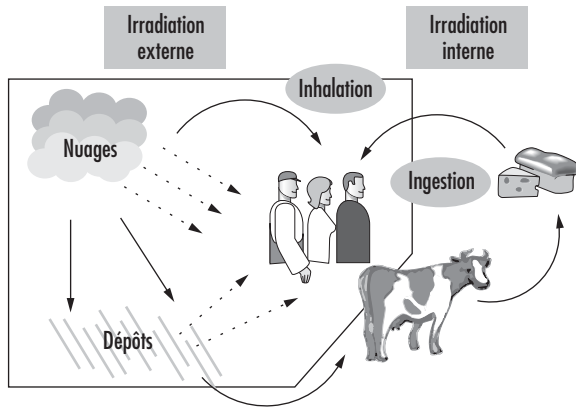
L'accident de Tchernobyl est un accident dit de «criticité»: la réaction nucléaire s'est emballée, c'est-à-dire qu'une augmentation soudaine et rapide des réactions de fission s'est produite en quelques secondes, échappant à tout contrôle. Elle a entraîné la destruction complète du cœur du réacteur et provoqué un rejet massif de radioactivité directement dans l'environnement (voir tableau 39.19). Ce rejet a atteint une hauteur de 2 km, ce qui a favorisé sa dispersion sur de grandes distances (hémisphère Nord, essentiellement). Les modalités de dispersion du nuage radioactif sont complexes, du fait des changements météorologiques durant la période des rejets (voir figure 39.6) (AIEA, 1991).

Tableau 39.18 • Exemples de radionucléides avec leurs périodes radioactives

Radionucléides	Symbole	Rayonnements émis	Période physique*	Demi-vie biologique après incorporation*
Barium 133	Ba-133	γ	10,7 a	65 j
Cérium 144	Ce-144	β, γ	284 j	263 j
Césium 137	Cs-137	β, γ	30 a	109 j
Cobalt 60	Co-60	β, γ	5,3 a	1,6 a
Iode 131	I-131	β, γ	18 j	7,5 j
Plutonium 239	Pu-239	α, γ	24 065 a	50 a
Polonium 210	Po-210	α	138 j	27 j
Strontium 90	Sr-90	β	29,1 a	18 a
Tritium	H-3	β	12,3 a	10 j

* a: années; j: jours.

Figure 39.5 • Modalités d'exposition aux rayonnements ionisants après un rejet accidentel de radioactivité dans l'environnement

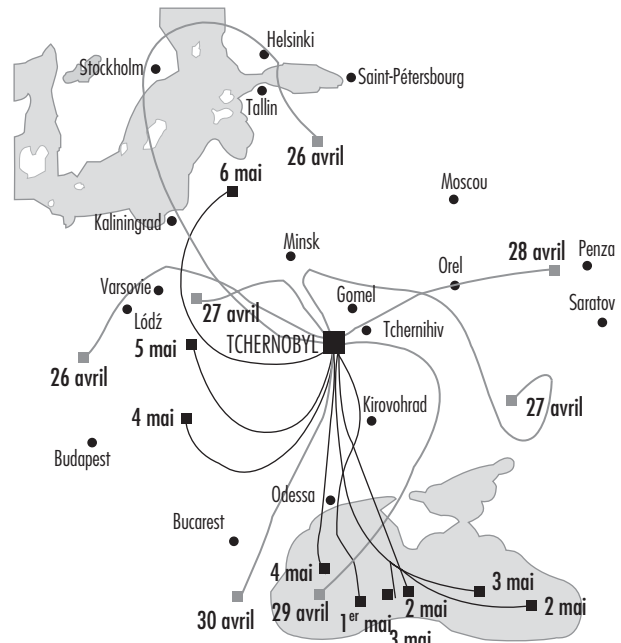


Des cartes de contamination ont été établies à partir de mesures environnementales portant sur le césium 137, un des principaux radioéléments rejetés (voir tableaux 39.18 et 39.19). En Biélorussie, Russie et Ukraine, trois zones géographiques ont été fortement contaminées (voir figure 39.7). La superficie des zones contaminées, les types de populations et leurs modes d'exposition sont indiqués au tableau 39.20. Dans le reste de l'Europe, les dépôts ont été moins importants (voir figure 39.8) (UNSCEAR, 1988).

L'accident de Three Mile Island a été causé par un «défaut de refroidissement» du cœur du réacteur pendant plusieurs heures. C'est un accident thermique sans emballement de la réaction nucléaire. Le cœur a été partiellement détruit. Du fait de la présence d'une enceinte de confinement, une quantité limitée de radioactivité a été rejetée dans l'environnement (voir tableau 39.19). Néanmoins, 200 000 personnes ont spontanément évacué la région bien qu'aucun ordre d'évacuation n'ait été donné.

Un accident s'est également produit dans un réacteur de production de plutonium sur la côte ouest de l'Angleterre (Windscale), en 1957 (voir tableau 39.19) à la suite d'un incendie du cœur. Cet accident a provoqué un rejet de radioactivité dans l'environnement par une cheminée de 120 m de haut.

Figure 39.6 • Trajets des rejets après l'accident de Tchernobyl entre le 26 avril et le 6 mai 1986



Les installations de traitement du combustible

Ces installations (voir figure 39.9) comportent, en amont des réacteurs, des usines de fabrication de combustible (extraction du minerai et transformation physique et chimique de l'uranium en «éléments combustibles» utilisables dans les réacteurs). Des risques d'accident existent sur les installations de transformation: ils sont surtout de nature chimique et liés à la présence d'un composé de l'uranium sous forme gazeuse, l'hexafluorure d'uranium (UF₆). Celui-ci peut produire, en se décomposant à l'air, de l'acide fluorhydrique (HF), un gaz chimiquement très corrosif.

En aval des réacteurs, il existe des installations pour stocker le combustible irradié ou pour le retraiter. Quatre accidents de

Tableau 39.19 • Comparaison de différents accidents nucléaires

Accidents	Type d'installation	Mécanisme de l'accident	Quantité totale d'activité rejetée (GBq)	Durée des rejets	Principaux radionucléides rejetés	Dose collective (hSv)
Kyshtym, 1957	Réservoir de produits de fission de haute activité	Explosion chimique	740 x 10 ⁶	Quasi instantanée	Strontium 90	2 500
Windscale, 1957	Réacteur de production de plutonium	Incendie	7,4 x 10 ⁶	Environ 23 heures	Iode 131, polonium 210, césium 137	2 000
Three Mile Island, 1979	Réacteur industriel PWR	Défaut de refroidissement	555	?	Iode 131	16-50
Tchernobyl, 1986	Réacteur industriel RBMK	Criticité	3 700 x 10 ⁶	Plus de 10 jours	Iode 131, iode 132, césium 137, césium 134, strontium 89, strontium 90	600 000

Source: UNSCEAR, 1993.

Figure 39.7 • Dépôts de césium 137 en Biélorussie, en Russie et en Ukraine après l'accident de Tchernobyl



criticité lors d'opérations chimiques de retraitement d'uranium enrichi ou de plutonium se sont produits dans le passé (Rodrigues, 1987). Les quantités de substances radioactives en jeu étaient faibles (quelques dizaines de kilogrammes, au maximum), comparées à celles des réacteurs de puissance. Les effets mécaniques de ces accidents sont toujours restés négligeables, sans rejet vers l'extérieur des installations. Seuls les travailleurs présents ont été exposés et ont subi une irradiation externe par des rayonnements gamma et des neutrons pendant des temps très courts (quelques minutes) et à des doses très élevées.

Un accident s'est produit en 1957 sur un réservoir de stockage de déchets fortement radioactifs, dans le premier complexe nucléaire construit dans le sud de l'Oural (Russie) pour la fabrication du plutonium à des fins militaires (accident de Kyshtym) (voir tableaux 39.19 et 39.21). Le réservoir, insuffisamment refroidi, a explosé, provoquant le rejet de 740 PBq (20 MCi) dans l'atmosphère et la contamination de plus de 16 000 km² (Akleyev, 1994).

Les réacteurs de recherche

Les risques de ces installations sont similaires à ceux des centrales nucléaires, quoique de moindre importance en raison de leur puissance beaucoup plus faible. Plusieurs accidents de criticité entraînant des irradiations significatives de personnels se sont produits sur ces installations (Rodrigues, 1987).

Tableau 39.20 • Superficie des zones contaminées, types de populations exposées et modes d'exposition en Biélorussie, Russie et Ukraine après l'accident de Tchernobyl

Types de population	Superficie (km ²)	Effectifs de population (milliers)	Modes d'exposition prédominants
Populations professionnellement exposées			
Employés sur place au moment de l'accident		≈0,44	Irradiation externe, inhalation, contamination cutanée causées par le réacteur endommagé, ses fragments dispersés sur le site et par l'eau, les vapeurs et les poussières radioactives
Sapeurs-pompiers		≈0,12	
Liquidateurs*		600-800	Irradiation externe, inhalation, contamination cutanée
Population générale			
Evacuée de la zone interdite dans les premiers jours		115	Irradiation externe causée par le nuage, inhalation de particules radioactives en suspension dans le nuage
Résidant dans les territoires contaminés**			
	(MBq/m ²)	(Ci/km ²)	
>1,5	(>40)	3 100	33
0,6-1,5	(15-40)	7 200	216
0,2-0,6	(5-15)	17 600	584
0,04-0,2	(1-5)	103 000	3 100
Résidant sur le reste du territoire (<0,04MBq/m ²)		280 000	Irradiation externe causée par les dépôts, ingestion de produits contaminés

*Personnes ayant participé aux tâches d'assainissement dans un périmètre de 30 km autour du site. Il s'agit aussi bien des sapeurs-pompiers, des militaires, des techniciens et des ingénieurs qui sont intervenus dans les premières semaines que des médecins et des chercheurs impliqués plus tard.

**Niveaux de contamination en césium 137.

Source: UNSCEAR, 1988; AIEA, 1991.

Les accidents lors d'utilisations industrielles (hors nucléaire) et médicales de radioéléments (Zerbib, 1993)

La perte de sources radioactives utilisées en gammagraphie industrielle (par exemple, pour l'inspection radiographique de joints ou de soudures) est l'accident le plus fréquent. La perte de sources à usage médical s'est également produite (voir tableau 39.22). Deux scénarios sont alors possibles. La source peut être emportée et conservée par une personne durant quelques heures (par exemple, dans la poche), puis signalée et restituée; elle provoque alors des brûlures localisées. Elle peut également être emportée à domicile, où l'irradiation prolongée de nombreuses personnes est alors possible.

Des accidents ont eu lieu à la suite de la récupération d'appareils de téléthérapie par des ferrailleurs. Ceux-ci avaient démonté les têtes des appareils renfermant les sources radioactives pour récupérer leurs matériaux et les ont ainsi mises à nu. Deux accidents importants de ce type ont entraîné une exposition du public: Ciudad Juárez (Mexique) et Goiânia (Brésil) (voir tableau 39.22 et encadré p. 35).

Tableau 39.21 • Superficie des zones contaminées et effectifs de populations exposées après l'accident de Kyshtym (Oural, 1957), selon le niveau de contamination en strontium 90

Contamination (kBq/m ²)	(Ci/km ²)	Superficie (km ²)	Population
≥ 37 000	≥ 1 000	20	1 240
≥ 3 700	≥ 100	120	1 500
≥ 74	≥ 2	1 000	10 000
≥ 3,7	≥ 0,1	15 000	270 000

L'accident de Ciudad Juárez a été découvert fortuitement (AIEA, 1989b). Le 16 janvier 1984, un camion transportant des barres d'acier déclenche un détecteur de rayonnements lors de son entrée dans un laboratoire scientifique de Los Alamos (Nouveau-Mexique, Etats-Unis). Les investigations permettent d'établir la présence de cobalt 60 dans les barres et de remonter à leur origine: une fonderie située au Mexique. Le 21 janvier, la provenance des matériaux contaminés est établie: il s'agit d'un dépôt de ferraille situé à Ciudad Juárez et qui s'avère fortement contaminé. Une surveillance systématique des routes et des autoroutes par des détecteurs repère un camion massivement contaminé et permet de retracer l'origine de la source: un appareil de téléthérapie stocké dans un centre médical. En décembre 1983, cet appareil avait été démonté et transporté chez un ferrailleur, et la capsule protégeant la source avait été rompue, libérant des pastilles de cobalt-60. Certaines d'entre elles étaient tombées dans le camion

Tableau 39.22 • Accidents liés à la perte de sources radioactives et ayant entraîné une exposition de la population

Pays (année)	Nombre de personnes exposées	Nombre de personnes ayant reçu des doses élevées*	Nombre de personnes décédées**	Source radioactive impliquée
Mexique (1962)	?	5	4	Cobalt 60
Chine (1963)	?	6	2	Cobalt 60
Algérie (1978)	22	5	1	Iridium 192
Maroc (1984)	?	11	8	Iridium 192
Mexique (Ciudad Juárez, 1984)	≈4 000	5	0	Cobalt 60
Brésil, (Goiânia, 1987)	249	50	4	Césium 137
Chine (Xinhou, 1992)	≈90	12	3	Cobalt 60
Etats-Unis, (Indiana, 1992)	≈90	1	1	Iridium 192

* Personnes exposées à des doses ayant pu entraîner des effets aigus (décès inclus) ou des séquelles.

** Parmi les personnes ayant reçu des doses élevées.

Source: Nénot, 1993.

L'accident de Goiânia, 1987

Entre le 21 et le 28 septembre 1987, plusieurs personnes furent admises à l'hôpital des maladies tropicales de Goiânia, ville d'un million d'habitants dans l'Etat de Goiás, au Brésil. Elles présentaient toutes des troubles similaires: vomissements, diarrhée, vertiges et lésions cutanées localisées en divers endroits du corps. Ces troubles furent attribués à une maladie parasitaire fréquente au Brésil. Le 28 septembre, le médecin responsable du service de vigilance sanitaire de la ville reçut la visite d'une femme qui lui apportait un sac contenant des débris d'un appareil récupéré dans une clinique désaffectée et une poudre qui émettait, au dire de cette personne, «une lueur bleue». Pensant que l'appareil était probablement un appareil à rayons X, le médecin contacta ses collègues de l'hôpital des maladies tropicales. Le département de l'environnement de l'Etat de Goiás fut averti et, le lendemain, un physicien vint effectuer des mesures dans la cour du service d'hygiène où le sac avait été déposé la veille. Il constata des niveaux de radioactivité très élevés. Les investigations déclenchées par les autorités compétentes permirent de remonter à l'origine de la source: il s'agissait d'une source de césium 137, d'une activité totale d'environ 50 TBq (1375 Ci). Elle provenait d'un appareil de téléthérapie laissé à l'abandon dans les locaux d'une clinique désaffectée depuis 1985. La tête de l'appareil avait été démontée le 10 septembre 1987 par deux ferrailleurs et la source de césium, sous forme de poudre, avait été progressivement séparée de son enveloppe de protection. Cette substance insolite et les fragments de l'appareil qu'elle avait contaminés avaient été peu à peu disséminés en plusieurs endroits de la ville. De nombreuses personnes les ayant transportés, manipulés ou simplement examinés — parents, amis, voisins — furent contaminées. Au total, sur plus de 100 000 personnes examinées, 129 avaient été très sérieusement contaminées, 50 durent être hospitalisées (dont 14 pour insuffisance médullaire) et 4 sont décédées, dont une petite fille âgée de 6 ans. Les conséquences économiques et sociales de l'accident furent dramatiques, pour l'ensemble de la ville de Goiânia, dont 1/1 000^e de la superficie a été touché, mais aussi pour l'Etat de Goiás: les prix agricoles, les loyers, la valeur des biens immobiliers et des terrains ont chuté et les habitants de l'Etat tout entier subirent une véritable discrimination.

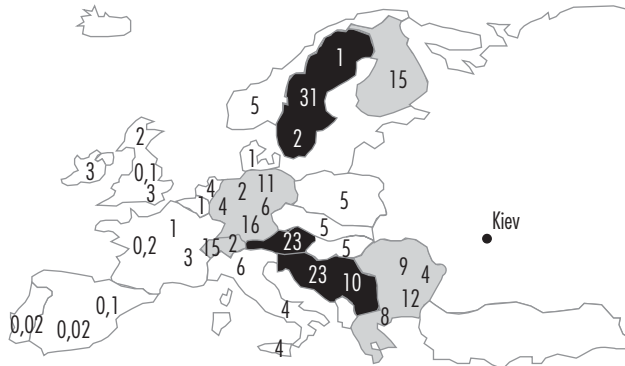
Source: AIEA, 1989a.

utilisé pour le transport et les autres avaient été dispersées dans le dépôt de ferraille lors de manipulations, se mélangeant aux débris de ferraille entreposés.

Sur les irradiateurs industriels (utilisés, par exemple, pour la préservation d'aliments, la stérilisation de produits médicaux ou encore la polymérisation de substances chimiques), des accidents se sont produits lorsque des travailleurs ont pénétré dans les chambres d'irradiation alors que les appareils fonctionnaient encore. Chaque fois, les règles de sécurité n'avaient pas été respectées et les systèmes de sécurité et d'alarme étaient déconnectés ou défectueux. Ces travailleurs ont subi de ce fait une irradiation externe à des débits de dose très élevés (doses mortelles en quelques minutes ou secondes) (voir tableau 39.23).

Enfin, des expositions accidentelles de travailleurs aboutissant à des contaminations de la peau ou de plaies, ou encore à l'ingestion ou l'inhalation de substances radioactives peuvent se produire lors de la préparation ou de la manipulation de sources radioactives (personnel médical et scientifique). Il faut mentionner que ce type d'accident existe aussi dans les installations du cycle nucléaire.

Figure 39.8 • Dépôts de césium 137 (kBq/km²) en Europe après l'accident de Tchernobyl



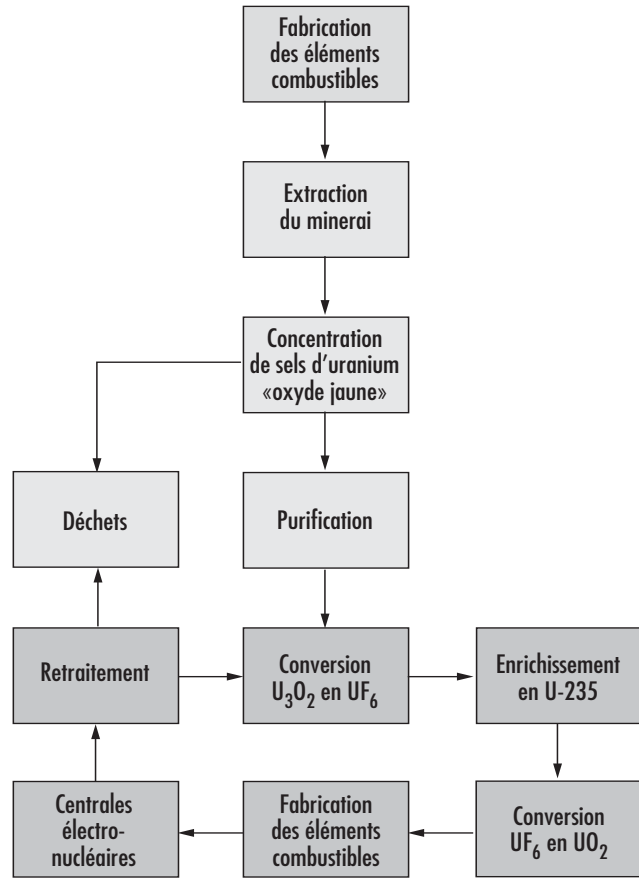
Source: UNSCEAR, 1988.

Les dimensions du problème sous l'angle de la santé publique

L'évolution de la fréquence des accidents dans le temps

Le bilan des accidents radiologiques est assuré grâce à un registre mondial (United States Radiation Accident Registry) établi à Oak Ridge (Etats-Unis) dans lequel sont consignés depuis 1944 les accidents survenant dans le monde entier faisant l'objet d'une publication et conduisant à l'exposition de personnes à des doses supérieures à 0,25 Sv au corps entier ou 6 Sv à la peau, ou encore 0,75 Sv aux autres tissus ou organes (voir encadré p. 39.37 pour la définition du Sievert). Ce registre exclut les accidents ayant pu conduire à des expositions plus faibles, mais néanmoins significatives sur le plan de la santé publique (voir ci-après les conséquences des irradiations). Le bilan des accidents radiologiques et nucléaires entre 1944 et 1988 montre une nette augmentation de leur nombre au cours de la période 1980-1988 (voir tableau 39.24). Le nombre de personnes impliquées dans les accidents a également augmenté de façon très importante. Cette

Figure 39.9 • Cycle du combustible nucléaire



hausse reflète probablement l'inclusion dans le bilan des populations exposées à Tchernobyl, notamment les 13 500 personnes qui résidaient initialement dans la zone interdite des 30 km. De

Tableau 39.23 • Principaux accidents survenus sur des irradiateurs industriels

Lieu, date	Appareil	Victimes	Niveaux, durée d'exposition	Organes et tissus touchés	Doses reçues (Gy)	Conséquences médicales
Forbach, août 1991	AE*	2	Quelques dGy/seconde	Mains, tête, tronc	40, peau	Brûlures sur 25 à 60 % de la surface corporelle
Maryland, décembre 1991	AE	1	?	Mains	55, mains	Amputations des doigts aux 2 mains
Viet Nam, novembre 1992	AE	1	1 000 Gy/minute	Mains	1,5 corps entier	Amputation de la main droite et d'un doigt de la main gauche
Italie, mai 1975	IC*	1	Quelques minutes	Tête et corps entier	8, moelle osseuse	Décès
San Salvador, février 1989	IC	3	?	Corps entier, jambes et pieds	3-8, corps entier	2 amputations de la jambe 1 décès
Israël, juin 1990	IC	1	1 minute	Tête et corps entier	10-20	Décès
Biélorussie, octobre 1991	IC	1	Quelques minutes	Corps entier	10	Décès

*AE: accélérateur d'électrons; IC: irradiateur cobalt 60.
Source: Zerbib, 1993; Nénot, 1993.

Tableau 39.24 • Bilan des accidents radiologiques et nucléaires survenus dans le monde entre 1944 et 1988 et figurant dans le registre mondial des accidents (Oak Ridge, Etats-Unis)

Période	1944-1979	1980-1988	1944-1988
Nombre total d'accidents	98	198	296
Nombre de personnes impliquées	562	136 053	136 615
Nombre de personnes exposées à des doses supérieures aux critères*	306	24 547	24 853
Nombre de décès (effets aigus)	16	53	69

* 0,25 Sv au corps entier, 6 Sv à la peau, 0,75 Sv aux autres tissus et organes.

plus, les accidents de Goiânia et de Ciudad Juárez se sont aussi produits durant cette période, entraînant l'exposition significative d'un grand nombre de personnes (voir tableau 39.22).

Les populations potentiellement exposées

Il faut établir une distinction entre les personnes professionnellement exposées aux rayonnements ionisants et le public. Selon le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des

Tableau 39.25 • Evolution du nombre de personnes exposées professionnellement aux rayonnements ionisants d'origine artificielle dans le monde (en milliers)

Type d'activité	1975-1979	1980-1984	1985-1989
Cycle du combustible nucléaire*	560	800	880
Domaine militaire**	310	350	380
Utilisations industrielles	530	690	560
Utilisations médicales	1 280	1 890	2 220
Total	2 680	3 730	4 040

* Fabrication et retraitement de combustibles: 40 000; exploitation de réacteurs: 430 000.

** Dont 190 000 sur navires.

Source: UNSCEAR, 1993.

rayonnements ionisants (UNSCEAR) (UNSCEAR, 1993), le nombre des personnes professionnellement exposées aux rayonnements ionisants dans le monde peut être estimé, pour la période 1985-1989, à 4 millions, dont 20% environ dans le cycle du combustible nucléaire (voir tableau 39.25). Le parc des irradiateurs dans les pays membres de l'AIEA était évalué en 1992 à 760 installations, dont 600 accélérateurs d'électrons et 160 irradiateurs gamma.

Qu'est-ce qu'une dose?

Dans le domaine des rayonnements ionisants, la dose est définie de plusieurs façons dont chacune correspond à un objectif différent.

La dose absorbée

La dose absorbée est la définition qui se rapproche le plus d'une dose au sens pharmacologique — quantité de substance administrée à un sujet rapportée à l'unité de poids (ou de surface). Elle représente la quantité d'énergie communiquée par les rayonnements ionisants par unité de masse de matière. Elle se mesure en grays (1 Gy = 1 joule/kg). Lorsqu'un individu est exposé de façon homogène — par exemple par irradiation externe par les rayonnements d'origine cosmique et terrestre ou par irradiation interne par le potassium 40 présent dans l'organisme — tous les organes et tissus reçoivent la même dose et l'on peut parler de «dose corps entier». Quand un individu est exposé de façon hétérogène à des rayonnements ionisants, certains organes ou tissus vont recevoir une dose beaucoup plus importante que le reste de l'organisme: il est plus intéressant alors, du point de vue des effets de cette exposition, de parler de «dose à l'organe». Par exemple, l'inhalation des produits de filiation du radon entraîne essentiellement une dose aux poumons, alors que l'incorporation d'iode radioactif provoque surtout une irradiation de la thyroïde: on parlera alors respectivement de dose aux poumons et de dose à la thyroïde.

Cependant, d'autres unités de dose ont été construites, pour tenir compte des différences d'effets entre les types de rayonnements et des différences de radiosensibilité des tissus et organes.

La dose équivalente

L'apparition d'effets biologiques (tels que l'inhibition de croissance cellulaire, la mort cellulaire, l'azoospermie) dépend de la dose absorbée, mais également du type de rayonnement. Les rayonnements alpha ont un pouvoir ionisant plus important que les rayonnements bêta ou gamma. Cette différence est prise en compte dans le calcul de la dose équivalente en appliquant des facteurs de pondération appelés «facteurs de pondération pour les rayonnements». Par exemple, pour les rayonnements gamma et bêta à faible pouvoir ionisant, le facteur de pondération a été fixé à 1. Pour les particules alpha à pouvoir ionisant élevé, le facteur de pondération a été fixé à 20 [CIPR 60]. L'unité de la dose équivalente est le sievert (Sv).

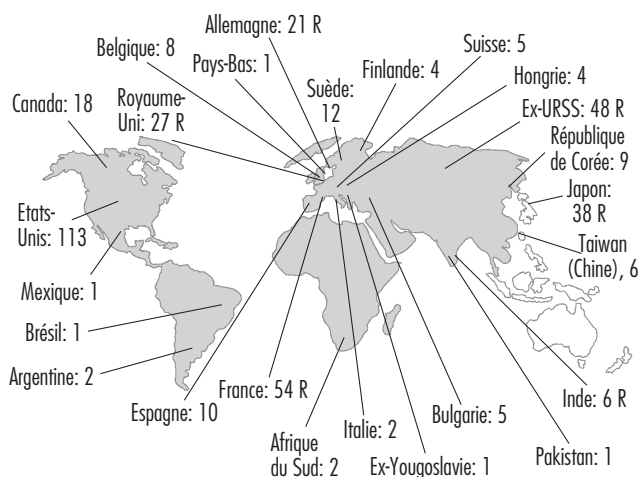
La dose efficace

Lors d'une irradiation hétérogène (par exemple, lors de l'exposition à divers radionucléides irradiant des organes différents), il peut être intéressant de combiner les doses reçues par les différents organes ou tissus pour calculer une «dose» globale. On tient compte pour cela de la sensibilité des tissus aux effets des rayonnements ionisants en appliquant, pour les tissus et les organes, des facteurs de pondération déterminés à partir des résultats des études épidémiologiques antérieures sur les cancers radio-induits. On calcule ainsi la dose efficace dont l'unité est encore appelée le sievert (Sv) [CIPR 60]. La dose efficace n'est, par conséquent, pas adaptée à l'évaluation épidémiologique des effets de l'exposition aux rayonnements ionisants, mais elle a été conçue dans un objectif de radioprotection, c'est-à-dire de gestion des risques.

La dose collective

La dose collective reflète l'exposition d'un groupe ou d'une population et non plus d'un individu. Elle est calculée en cumulant les doses individuelles reçues ou en multipliant la dose individuelle moyenne par le nombre de personnes exposées dans les groupes ou populations considérés. L'unité est «l'homme sievert» (h.Sv). La dose collective permet d'évaluer les conséquences de l'exposition aux rayonnements ionisants à l'échelle d'une population ou d'un groupe.

Figure 39.10 • Répartition des réacteurs de puissance et des installations de retraitement du combustible dans le monde en 1989-90 (R: usines de retraitement de combustible irradié en 1989)



Source: UNSCEAR, 1993.

En ce qui concerne la population en général, la répartition des installations nucléaires selon les pays fournit une indication quant aux zones d'exposition potentielle (voir figure 39.10).

Les conséquences pour la santé

Les effets sur la santé directement liés aux rayonnements ionisants

Les effets des rayonnements ionisants sont dans l'ensemble bien connus. Leur nature dépend à la fois du niveau de dose reçue et du débit de dose (dose reçue par unité de temps (voir encadré p. 39.37)).

Les effets déterministes

Ils surviennent lorsque la dose dépasse un certain seuil et lorsque le débit de dose est élevé. Le seuil de dose est variable selon l'organe (voir tableau 39.26). Plus la dose est élevée, plus l'effet est grave.

Lors des accidents qui viennent d'être passés en revue, des effets déterministes peuvent survenir après une irradiation grave localisée: irradiation externe par une source, contact direct avec une source (source égarée emportée et mise en poche) ou encore contamination cutanée. Ces irradiations entraînent des brûlures radiologiques qui s'accompagnent de nécrose des tissus lorsque la dose locale est très importante, de 20 à 25 Gray (Gy) (voir tableau 39.23 et encadré, p. 39.37). Lorsque l'irradiation est globale et la dose supérieure en moyenne à 0,5 Gy, elle peut provoquer un syndrome d'irradiation aiguë, se traduisant par des troubles digestifs (nausées, vomissements, voire diarrhée) et une aplasie plus ou moins sévère de la moelle osseuse. Irradiations globales et localisées peuvent être combinées.

Lors des accidents de criticité dans les installations de traitement du combustible ou dans les réacteurs de recherche, 9 décès sont survenus parmi les 60 travailleurs exposés (Rodrigues, 1987). Les personnes décédées avaient reçu entre 3 et 45 Gy, tandis que pour les survivants, les doses étaient comprises entre 0,1 et 7 Gy. Parmi les survivants, on a mis en évidence des syndromes d'irradiation

Tableau 39.26 • Effets déterministes: seuils pour divers organes

Tissu et effet	Dose équivalente reçue à l'organe en une exposition unique (Sv)
Testicules	
Stérilité temporaire	0,15
Stérilité définitive	3,5-6,0
Ovaires	
Stérilité	2,5-6,0
Cristallin	
Opacités détectables	0,5-2,0
Diminution de la vue (cataracte)	5,0
Moelle osseuse	
Dépression de l'hématopoïèse	0,5

Source: CIPR, 1991.

aiguë (gastro-intestinaux et hématologiques), des cataractes bilatérales et des nécroses de membres nécessitant une amputation.

Lors de l'accident de Tchernobyl, le personnel de la centrale et les équipes de secours qui sont intervenus sans protection particulière ont subi dans les premières heures ou les journées suivant l'accident d'intenses irradiations bêta et gamma. Cinq cents personnes ont été hospitalisées, dont 237 pour un syndrome d'irradiation aiguë; 28 sont décédées malgré les traitements (voir tableau 39.27) (UNSCEAR, 1988). D'autres ont subi des irradiations localisées (membres et extrémités, parfois plus de 50% de la surface corporelle) et portent encore, après plusieurs années, de nombreuses séquelles cutanées (Peter et coll., 1994).

Les effets stochastiques

Ces effets sont de nature probabiliste: leur fréquence augmente avec la dose reçue, mais leur gravité est indépendante de la dose. Les principaux effets stochastiques sont:

- *Les mutations géniques*: elles ont été observées chez l'animal et chez l'humain; la transmission de mutations géniques à la descendance n'a été mise en évidence que chez l'animal.
- *Les cancers*: il existe de nombreuses études épidémiologiques sur le risque de cancer à la suite d'une irradiation (irradiés théra-

Tableau 39.27 • Répartition, selon le niveau de gravité, des patients ayant présenté un syndrome d'irradiation aiguë (SIR) après l'accident de Tchernobyl

Degré de sévérité du SIR	Dose correspondante (Gy)	Nombre de sujets	Nombre de décès (%)	Délai moyen de survie (jours)
I	1-2	140	—	—
II	2-4	55	1 (1,8)	96
III	4-6	21	7 (33,3)	29,7
IV	> 6	21	20 (95,2)	26,6

Source: UNSCEAR, 1988.

peutiques, survivants d'Hiroshima et de Nagasaki). La synthèse de ces études est régulièrement effectuée par l'UNSCEAR (1988, 1994). Les cancers surviennent principalement entre 5 et 15 ans après l'exposition, selon l'organe ou le tissu; les cancers pour lesquels une association avec les rayonnements ionisants a été mise en évidence sont présentés au tableau 39.28. Chez les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, des excès significatifs de cancer ont été mis en évidence au-dessus de 0,05 Sv.

- *Certaines tumeurs bénignes*: adénomes bénins de la thyroïde.

Deux points importants sur les effets des rayonnements ionisants restent cependant controversés ou ne sont pas encore connus avec précision:

Premièrement, quels sont les effets d'une irradiation à faible dose (inférieure à 0,2 Sv) et à faible débit de dose? À l'exception de l'exposition au radon, la plupart des études épidémiologiques servant de base à la quantification des risques concernent des populations exposées durant des périodes très brèves à des doses relativement élevées (survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, personnes irradiées pour des raisons thérapeutiques); l'évaluation des risques de cancer aux doses et débits de dose plus faibles repose sur des extrapolations, essentiellement à partir des résultats des études chez les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki. Plusieurs études effectuées chez les travailleurs du nucléaire, dont les expositions sont faibles et s'étalent sur quelques années ou plus, ont mis en évidence des niveaux de risque (pour les leucémies, d'une part, et les autres cancers, d'autre part) compatibles avec ces extrapolations (UNSCEAR, 1994; Cardis, 1995); ces résultats devront être confirmés.

Deuxièmement, existe-t-il un seuil de dose en deçà duquel il n'y aurait pas d'effet? Pour le moment, cette question reste sans réponse. Des études expérimentales ont montré que les dommages, dus à des erreurs spontanées ou à des facteurs environnementaux, que subit en permanence le matériel génétique, l'ADN, sont constamment réparés. Mais ces réparations ne sont pas toujours efficaces et elles aboutissent parfois à la transformation maligne de cellules (UNSCEAR, 1994).

Les autres effets

Il faut enfin mentionner les effets tératogènes d'une irradiation en cours de grossesse. Ceux-ci n'ont été observés que chez les enfants des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, lors d'une irradiation au cours du premier trimestre de la grossesse. Il s'agissait de microcéphalies et de retards mentaux (Otake, Schull et Yoshimura, 1989; Otake et Schull, 1992). Il est difficile de se prononcer sur la nature stochastique ou déterministe de ces effets, bien que les analyses suggèrent l'existence d'un seuil de l'ordre de 0,1 à 0,2 Gy, pour les retards mentaux uniquement.

Les effets observés lors de la catastrophe de Tchernobyl

La catastrophe de Tchernobyl est l'accident nucléaire le plus important qui se soit produit jusqu'ici. Cependant, l'ensemble des conséquences sur la santé des populations les plus exposées n'a pas, 10 ans après, été évalué de façon précise. Il y a plusieurs raisons à cela:

- certaines conséquences possibles ne peuvent apparaître que de nombreuses années après le début de l'exposition (de 10 à 15 ans pour les cancers solides);
- la mise en place d'études épidémiologiques s'est faite avec retard; il est donc possible que des effets n'aient pas été détectés dans les premières années suivant l'accident;
- des données utiles pour la quantification des risques de cancer n'ont pas toujours pu être recueillies à temps. Des données manquent, en particulier, pour estimer la contribution de cer-

Tableau 39.28 • Résultats des études épidémiologiques sur les expositions à fort débit de dose pour différents sites de cancer

Site de cancer	Hiroshima/Nagasaki		Autres études Etudes positives/total ¹
	Mortalité	Incidence	
<i>Système hématopoïétique</i>			
Leucémies	+*	+*	6/11
Lymphomes (non spécifiés)	+		0/3
Lymphomes non hodgkiniens		+*	1/1
Myélome	+	+	1/4
<i>Cavité orale</i>			
Glandes salivaires	+	+	0/1
		+*	1/3
<i>Système digestif</i>			
Œsophage	+*	+*	2/3
Estomac	+*	+*	2/4
Intestin grêle			1/2
Côlon	+*	+*	0/4
Rectum	+	+	3/4
Foie	+*	+*	0/3
Vésicule biliaire			0/2
Pancréas			3/4
<i>Système respiratoire</i>			
Cavité nasale			
Larynx			0/1
Trachée, bronches, poumons	+*	+*	1/3
<i>Peau</i>			
Non spécifié			1/3
Mélanomes			0/1
Autres cancers		+*	0/1
Seins (femmes)	+*	+*	9/14
<i>Tractus génital</i>			
Utérus (non spécifié)	+	+	2/3
Corps utérin			1/1
Ovaires	+*	+*	2/3
Autres (féminin)			2/3
Prostate	+	+	2/2
<i>Tractus urinaire</i>			
Vessie	+*	+*	3/4
Reins			0/3
Autres			0/1
<i>Système nerveux central</i>			
Thyroïde		+*	4/7
Os			2/6
Tissu conjonctif			0/4
Tous cancers, sauf leucémies			1/2

+ Sites étudiés chez les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki. * Sites pour lesquels un excès significatif a été mis en évidence.

¹ Etudes de cohortes (incidence ou mortalité) et études cas témoins.

Source: UNSCEAR, 1994.

tains iodés radioactifs rejetés lors de l'accident (tellure 132, iode 133) aux doses à la thyroïde (Williams et coll., 1993);

Tableau 39.29 • Evolution de l'incidence* et du nombre total des cas de cancer de la thyroïde chez l'enfant, en Biélorussie, en Ukraine et en Russie sur la période 1981-1994

	Incidence pour 100 000		Nombre de cas	
	1981-1985	1991-1994	1981-1985	1991-1994
<i>Biélorussie</i>				
Ensemble du pays	0,3	3,06	3	333
Région de Gomel	0,5	9,64	1	164
<i>Ukraine</i>				
Ensemble du pays	0,05	0,34	25	209
Cinq régions les plus contaminées	0,01	1,15	1	118
<i>Russie</i>				
Ensemble du pays	?	?	?	?
Régions de Briansk et Kalouga	0	1,00	0	20

* L'incidence désigne un taux: c'est le rapport entre le nombre de nouveaux cas d'une maladie pendant une période donnée et l'effectif de la population concernée pendant la même période.
Source: Stsjazhko et coll., 1995.

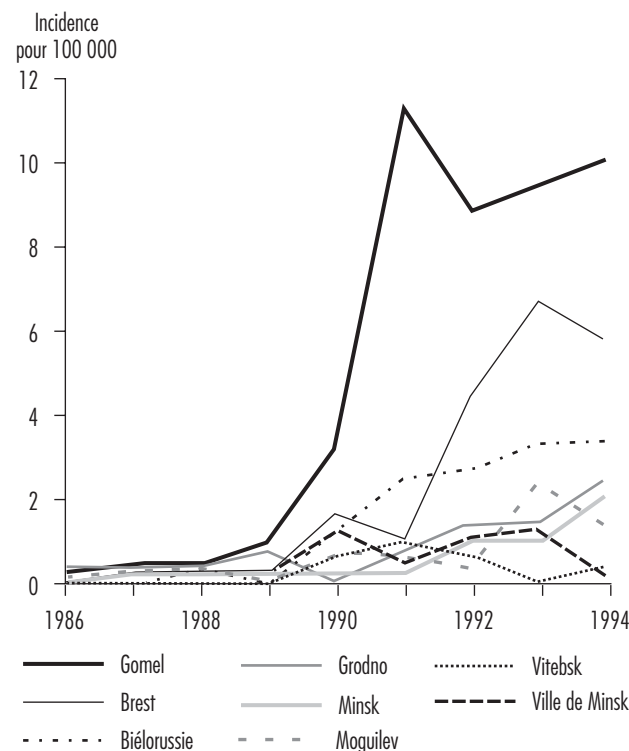
- de nombreuses personnes initialement exposées et qui ont quitté les régions contaminées ont probablement été perdues de vue.

Travailleurs. On manque, pour le moment, d'informations sur le suivi de l'ensemble des personnes fortement irradiées dans les premiers jours de l'accident. En ce qui concerne les liquidateurs (voir tableau 39.20), des études sont en cours pour étudier les risques de cancers solides et de leucémies. Ces études se heurtent à plusieurs difficultés. De nombreux liquidateurs provenaient de différentes régions de l'ex-URSS et sont repartis après avoir travaillé sur le site de Tchernobyl; cet éloignement entrave évidemment leur suivi sanitaire régulier. De plus, des questions se posent quant à la fiabilité des données de l'époque pour évaluer les doses individuelles reçues. Elles devront donc être «reconstruites» de façon rétrospective.

Population générale. Le seul effet vraisemblablement lié aux rayonnements ionisants observé à ce jour dans la population est l'augmentation, à partir de 1989, de l'incidence du cancer de la thyroïde chez les enfants de moins de 15 ans. Elle a été mise en évidence en Biélorussie à partir de 1989, trois années seulement après l'accident. Les données ont été analysées et confirmées par différents groupes d'experts (Williams et coll., 1993). L'augmentation est particulièrement marquée dans les régions les plus contaminées de Biélorussie, notamment la région de Gomel. Alors que le cancer de la thyroïde est très rare avant l'âge de 15 ans (de 0,1 à 0,3 cas pour 100 000 et par an), son incidence chez l'enfant a été multipliée par 10 sur l'ensemble du pays et par 20 environ dans la région de Gomel (voir tableau 39.29 et figure 39.11) (Stsjazhko et coll., 1995). Une augmentation plus tardive a également été rapportée en Ukraine (multiplication de l'incidence par 10 dans les 5 régions les plus contaminées), puis dans la région de Briansk, en Russie (voir tableau 39.29). Par ailleurs, une augmentation chez l'adulte est suspectée, mais non confirmée.

La mise en place, dans les régions contaminées, de campagnes de dépistage systématique (notamment à l'aide d'examen échographiques permettant de détecter des tumeurs thyroïdiennes de

Figure 39.11 • Incidence* du cancer de la thyroïde chez les enfants âgés de moins de 15 ans en Biélorussie



* Incidence: voir définition donnée dans le tableau 39.29.

quelques millimètres de diamètre), a pu révéler des cancers latents qui existaient avant l'accident. Mais les caractéristiques des cancers décelés (tumeurs agressives et rapidement évolutives en majorité) et l'ampleur de l'augmentation permettent de penser que celle-ci est due en partie à l'accident.

Lors de celui-ci, une importante quantité d'iode a été rejetée. En l'absence de mesure de prévention, l'iode radioactif se fixe préférentiellement sur la thyroïde. Dans les zones les plus contaminées après l'accident (région de Gomel, par exemple), les doses à la thyroïde étaient élevées, particulièrement chez les enfants (Williams et coll., 1993).

L'exposition aux rayonnements est un facteur de risque bien documenté pour le cancer de la thyroïde. Une douzaine d'études portant sur des enfants ayant subi une irradiation externe de la tête et du cou à des fins médicales ont montré une nette augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde. Dans la majorité de ces études, l'augmentation devient nette au bout de 10 à 15 ans, mais elle est parfois détectée entre 3 à 7 ans après l'exposition. Par contre, les effets d'une irradiation interne par l'iode-131 et par des isotopes d'iode à période courte chez l'enfant ne sont pas bien établis (Shore, 1992).

L'ampleur exacte et l'évolution dans les prochaines années de l'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde dans les populations les plus exposées après l'accident de Tchernobyl devront être précisées. Les études épidémiologiques en cours devraient permettre de quantifier les risques de cancer de la thyroïde en fonction du niveau de dose à la thyroïde et de préciser le rôle éventuel d'autres facteurs de risque, génétiques ou environnemen-

Tableau 39.30 • Echelle internationale pour la classification des incidents nucléaires

Niveau	Extérieur du site	Intérieur du site	Barrières de défense
7 — Accident majeur	Rejet majeur, effets étendus sur la santé et sur l'environnement		
6 — Accident grave	Rejet important, possibilité d'application de toutes les contre-mesures		
5 — Accident	Rejet limité, possibilité d'application partielle des contre-mesures	Réacteur/barrières de défense gravement endommagés	
4 — Accident	Faible rejet, exposition du public équivalente aux limites	Réacteur/barrières endommagés, exposition mortelle des travailleurs	
3 — Incident grave	Très faible rejet, exposition du public inférieure aux limites	Contamination grave, effets aigus sur la santé des travailleurs	Quasi-accident
2 — Incident		Contamination importante, surexposition des travailleurs	Défaillances importantes des mesures de sûreté
1 — Anomalie			Anomalie sortant du régime de fonctionnement autorisé
0 — Ecart	Importance nulle du point de vue de la sûreté		

taux (en effet, la carence en iode est fréquente dans les régions concernées).

Par ailleurs, parmi les effets qui étaient attendus entre 5 et 10 ans après la catastrophe de Tchernobyl dans les populations les plus exposées, figurait l'augmentation de l'incidence des leucémies. Pour le moment, aucun excès de leucémie n'a été observé dans les zones les plus contaminées, y compris chez l'enfant, qui est pourtant plus sensible aux effets des rayonnements ionisants. Cependant, les études effectuées jusqu'ici comportent des limites méthodologiques et ne permettent pas de conclure de façon définitive à l'absence d'excès de leucémies.

Les conséquences psychosociales

La survenue de troubles psychiques plus ou moins sévères à la suite d'un traumatisme psychique est bien établie et a été abondamment étudiée à la suite de catastrophes environnementales (inondations, éruptions volcaniques, tremblements de terre). L'état de stress post-traumatique en représente une conséquence

sévère, durable et invalidante pour les personnes atteintes (APA, 1996).

L'essentiel des connaissances sur les troubles psychiques et le stress lors d'accidents radiologiques vient des études effectuées après l'accident de Three Mile Island, aux Etats-Unis. Dans l'année suivant l'accident, elles ont montré l'existence d'effets psychologiques immédiats dans la population exposée et la sensibilité plus importante des mères de jeunes enfants chez lesquelles des troubles anxiodépressifs ont été observés (Bromet et coll., 1982). Chez les travailleurs de la centrale également, une fréquence de ce type de troubles plus élevée a été constatée chez les employés d'une autre centrale non accidentée. Dans les années suivantes, un quart environ des personnes incluses dans des enquêtes ont présenté des troubles psychologiques, voire psychiatriques relativement importants, troubles réactivés lors de la réouverture de la centrale; pour les trois quarts restants, les troubles psychologiques n'étaient pas plus fréquents que dans des populations témoins (Dew et Bromet, 1993). Les troubles psychologiques étaient plus fréquents chez les personnes résidant à proximité de la centrale, ayant évacué leur domicile au moment de l'accident, ne bénéficiant pas d'un soutien solide de leur entourage ou ayant des antécédents de troubles psychiatriques (Baum, Cohen et Hall, 1993).

Des études ont également été effectuées dans les populations de l'ex-URSS touchées par l'accident de Tchernobyl (liquidateurs, personnes résidant en permanence dans des zones contaminées). Elles montrent une augmentation significative et durable des symptômes psychologiques. Cette détresse psychologique peut avoir un impact important sur la santé publique. Mais, pour le moment, on manque encore d'informations rigoureuses qui permettraient de connaître la nature et la gravité des divers troubles psychiques, ainsi que leur fréquence dans certains groupes de populations (les liquidateurs, par exemple). Le contexte socio-économique difficile, les divers systèmes de réparation mis en place par les autorités, l'évacuation et le relogement (environ 100 000 personnes supplémentaires ont été relogées dans les années suivant l'accident), les contraintes sur le mode de vie (par exemple, l'alimentation) subies par les personnes résidant dans les zones contaminées sont autant de facteurs qui devraient être pris en compte dans l'évaluation des conséquences psychosociales de l'accident.

Tableau 39.31 • Exemples de niveaux d'intervention génériques recommandés pour la mise en place de mesures de protection de la population en cas d'accident

Mesures de protection	Niveau d'intervention (dose évitée)
Urgentes	
Confinement	10 mSv
Evacuation	50 mSv
Distribution d'iode stable	100 mGy
Différées	
Relogement temporaire	30 mSv en 30 jours; 10 mSv les 30 jours suivants
Relogement définitif	1 Sv sur la vie entière

Source: AIEA, 1994.

Les principes et les directives de prévention

Les principes et les directives de sûreté

Les utilisations industrielles et médicales de sources radioactives

Il faut rappeler que les accidents majeurs sont liés à des installations nucléaires. Cependant, les autres utilisations de radio-éléments ont entraîné, elles aussi, de nombreux accidents avec des conséquences souvent graves pour les travailleurs ou le public. La prévention de ces accidents est donc essentielle, d'autant plus que le traitement médical est décevant lorsque les doses sont élevées. La prévention repose sur la formation du personnel et sur le recensement exhaustif des sources utilisées et de leur localisation, depuis leur fabrication jusqu'à leur élimination ou stockage définitif. Par ailleurs, des principes de sûreté et des recommandations ont été publiés par l'AIEA pour l'utilisation de sources radioactives dans l'industrie, la médecine et la recherche (AIEA, 1990). Les concepts sont voisins de ceux présentés ci-après pour les installations nucléaires.

La sûreté des installations nucléaires (AIEA, 1988)

L'objectif recherché est de protéger en toutes circonstances l'être humain et son environnement naturel contre la dispersion des produits radioactifs. Pour cela, un ensemble de dispositions est appliqué à tous les stades de la conception, de la construction, de l'exploitation et de la mise à l'arrêt des installations nucléaires.

La sûreté des installations nucléaires repose tout d'abord sur le principe de «défense en profondeur», c'est-à-dire la juxtaposition de mesures et de systèmes redondants visant à pallier d'éventuelles défaillances techniques ou humaines. Concrètement, des barrières successives sont interposées entre les produits radioactifs contenus dans l'installation et l'environnement. Sur les réacteurs de puissance, la barrière ultime est l'enceinte de confinement (absente sur la centrale de Tchernobyl, présente sur celle de Three Mile Island). Pour éviter la défaillance de ces barrières ou en limiter les conséquences, trois fonctions de sûreté doivent être assurées à chaque instant de la vie de la centrale: le contrôle de la réaction nucléaire, le refroidissement du combustible et le confinement des produits radioactifs.

Un autre principe essentiel de la sûreté est le «retour d'expérience»: il s'agit de tirer tous les enseignements possibles d'accidents ou d'incidents, même mineurs, pour améliorer la sûreté des installations existantes. Ainsi, les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl ont été analysés et des améliorations ont été engagées afin qu'ils ne se répètent pas sur d'autres centrales.

Enfin, il convient de signaler que des efforts importants ont été déployés pour promouvoir une «culture de sûreté» au sein des installations nucléaires, c'est-à-dire pour prendre en compte en permanence les problèmes de sûreté dans l'organisation, les activités et les pratiques, ainsi que les comportements individuels. De plus, pour faciliter la perception de l'importance des incidents ou accidents survenant dans les installations nucléaires, une échelle internationale pour la classification des incidents nucléaires (INES) a été construite, identique, dans son principe, aux échelles mesurant la gravité de certains phénomènes naturels tels que les séismes et le vent (voir tableau 39.30). Elle ne constitue cependant pas un outil d'évaluation de la sûreté ou de comparaison internationale.

Les principes de radioprotection lors d'accidents comportant une exposition de la population générale

Lorsqu'il y a risque d'exposition du public, des mesures de protection peuvent être nécessaires pour prévenir ou limiter l'exposition aux rayonnements ionisants afin d'éviter, en particulier, la survenue d'effets déterministes. Les premières contre-mesures à envisager en urgence sont le confinement, l'évacuation et la distribution d'iode stable, qui permet de saturer la thyroïde s'il est ingéré

suffisamment tôt et d'éviter la fixation d'iode radioactif. Pour être efficace, toutefois, la saturation de la thyroïde doit intervenir avant le début de l'exposition ou peu de temps après. Enfin, il peut être nécessaire de reloger la population, de décontaminer la zone sinistrée et de contrôler les travaux agricoles et les denrées alimentaires, et cela de manière temporaire ou permanente, selon les cas. A chacune de ces mesures correspond un «niveau d'action» (voir tableau 39.31) qu'il convient de ne pas confondre avec les limites de dose recommandées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) pour les travailleurs et la population en général, limites édictées dans un objectif de prévention dans un contexte non accidentel (CIPR, 1991).

Les besoins en matière de recherche et les tendances futures

En matière de sûreté, les efforts de recherche portent actuellement sur la conception de réacteurs de puissance prenant en compte les risques d'accidents majeurs (réduction des risques de fusion du cœur et limitation des conséquences potentielles de ces accidents).

L'expérience tirée des accidents devrait permettre d'améliorer la prise en charge thérapeutique des personnes gravement irradiées. Dans le traitement des aplasies médullaires radio-induites, les recherches cliniques s'orientent actuellement vers l'utilisation de facteurs stimulant la croissance des cellules de la moelle osseuse (facteurs de croissance hématopoïétique) (Thierry et coll., 1995).

Il subsiste des incertitudes sur les effets des faibles doses et débits de dose de rayonnements ionisants. L'amélioration des connaissances à ce sujet est importante sur le plan scientifique et pour la radioprotection (limites de doses pour la population en général et les travailleurs). La recherche biologique aide à mieux appréhender les mécanismes de cancérogenèse. Des études épidémiologiques portant sur un grand nombre d'individus, notamment celles en cours chez les travailleurs du nucléaire, devraient permettre d'améliorer la précision des estimations de risque de cancer à faibles doses et débits de dose. L'étude des populations qui ont été ou sont encore exposées du fait d'accidents radiologiques devrait apporter des connaissances sur les effets de doses plus fortes souvent délivrées à de faibles débits.

Il est essentiel, par ailleurs, de se préparer à l'évaluation des conséquences sur la santé d'accidents radiologiques éventuels, c'est-à-dire de se doter de structures et d'outils permettant de recueillir en temps voulu les données essentielles.

Enfin, de nombreuses études sont encore nécessaires pour appréhender les conséquences psychosociales des accidents, c'est-à-dire pour mieux cerner la nature et la fréquence des réactions psychologiques post-traumatiques (pathologiques ou non) et leurs facteurs de risque. Ces études sont essentielles si l'on veut améliorer la prise en charge des individus impliqués, qu'il s'agisse des travailleurs ou de la population en général.

LES MESURES DE SÉCURITÉ ET DE SANTÉ DANS LES RÉGIONS AGRICOLES CONTAMINÉES PAR DES RADIONUCLÉIDES: L'EXPÉRIENCE DE TCHERNOBYL

*Yuri Kundiev, Leonard A. Dobrovolsky
et V.I. Chernyuk*

La contamination massive de terres agricoles par des radionucléides a généralement pour cause un accident majeur dans une usine ou une centrale nucléaire. Des accidents de ce genre sont survenus à Windscale (Angleterre) et dans le sud de l'Ou-

ral (Russie). Le plus important est celui qui s'est produit en avril 1986 à la centrale nucléaire de Tchernobyl, entraînant une contamination massive des sols sur plusieurs milliers de kilomètres carrés.

Les principaux facteurs qui influent sur les effets des rayonnements dans les régions agricoles sont les suivants :

- exposition unique ou prolongée;
- quantité totale de substances radioactives rejetée dans l'environnement;
- quantité de radionucléides dans les retombées;
- distance entre la source de rayonnement et les terres et établissements agricoles;
- caractéristiques hydrogéologiques et pédologiques des terres agricoles et objet de leur utilisation;
- type de travail de la population rurale; régime alimentaire, approvisionnement en eau;
- période écoulée depuis l'accident radiologique.

Des radionucléides, pour la plupart volatils, ayant une activité supérieure à 50 millions de curies (Ci) ont été dispersés dans l'environnement à la suite de l'accident de Tchernobyl. Au cours de la première étape, qui a duré 2,5 mois (la «période de l'iode»), l'iode 131 constituait le plus grand danger biologique, étant donné les fortes doses de rayonnements gamma à haute énergie.

Le travail sur les terres agricoles pendant la période de l'iode doit faire l'objet d'une réglementation très stricte. L'iode 131 s'accumule dans la glande thyroïde où il provoque des lésions. À la suite de l'accident de Tchernobyl, on a délimité, dans un rayon de 30 km autour de la centrale, une zone de rayonnement à très haute intensité à l'intérieur de laquelle il était interdit de vivre ou de travailler.

À l'extérieur de la zone interdite, quatre autres zones ont été définies selon le niveau de rayonnements gamma des sols et selon le type d'activité agricole qui pouvait y être pratiquée; l'intensité du rayonnement dans ces quatre zones, mesurée en roentgens (R), était la suivante au cours de la période de l'iode :

- zone 1 — moins de 0,1 mR/h;
- zone 2 — de 0,1 à 1 mR/h;
- zone 3 — de 1,0 à 5 mR/h;
- zone 4 — 5 mR/h et plus.

En fait, comme la contamination par les radionucléides était inégalement répartie au cours de la période de l'iode, le travail agricole a continué dans ces zones à des niveaux de rayonnements gamma allant de 0,2 à 25 mR/h. Outre l'absence d'uniformité de la contamination, la variation des niveaux de rayonnements gamma était due aux différences de concentration des radionucléides dans les diverses cultures. Les cultures fourragères, en particulier, sont exposées à des émetteurs gamma de haute intensité au cours de la récolte, du transport, de l'ensilage et de la distribution aux animaux.

Après la désintégration de l'iode 131, ce sont le césium 137 et le strontium 90, des nucléides à longue durée de vie, qui représentent le plus grand danger pour les travailleurs agricoles. Le césium 137, un émetteur gamma, est un analogue chimique du potassium; ingéré par les humains ou les animaux, il se distribue uniformément dans l'ensemble de l'organisme et est excrété assez rapidement dans l'urine et les fèces. Le fumier des régions contaminées représente donc une autre source de rayonnements et il faut le retirer le plus rapidement possible des exploitations d'élevage et l'entreposer dans des endroits spéciaux.

Le strontium 90, un émetteur bêta, est un analogue chimique du calcium; il se dépose dans la moelle épinière des humains et des animaux. Le strontium 90 et le césium 137 peuvent pénétrer dans l'organisme humain par le biais de l'ingestion de lait, de viande ou de légumes contaminés.

La division des terres agricoles en zones à la suite de la désintégration des radionucléides à courte durée de vie obéit à un principe différent. Ce n'est plus l'intensité des rayonnements gamma qui entre ici en ligne de compte, mais la quantité de sol contaminé par le césium 137, le strontium 90 et le plutonium 239.

Lorsque la contamination est particulièrement grave, la population est évacuée des régions touchées, et le travail agricole se fait par rotation de deux semaines. Les critères de délimitation des zones dans les régions contaminées sont énumérés au tableau 39.32.

Les gens qui travaillent dans des terres agricoles contaminées par des radionucléides peuvent en absorber par inhalation ou par contact avec les poussières de sol et de matières végétales. Dans ce cas, les émetteurs bêta (strontium 90) et les émetteurs alpha sont extrêmement dangereux.

Après un accident dans une centrale nucléaire, une partie des matières radioactives qui pénètrent dans l'environnement se compose de particules du combustible nucléaire de faible dispersion et de haute activité — dites «particules chaudes».

Le travail agricole et le vent génèrent énormément de poussière renfermant des particules chaudes, ainsi que l'a confirmé l'examen de filtres à air prélevés sur des tracteurs utilisés dans les zones contaminées.

L'évaluation des doses reçues au poumon par les travailleurs agricoles exposés à des particules chaudes, à l'extérieur de la zone de 30 km, a mis en évidence des niveaux de plusieurs millisieverts (Loshchilov et coll., 1993).

Selon les données de Bruk, Kaduka et Parkhomenko (1989), l'activité totale du césium 137 et du césium 134 dans la poussière inhalée par les conducteurs d'engins se situait entre 0,005 et 1,5 nCi/m³. Ces auteurs ont calculé que la dose efficace au poumon variait entre 2 et 70 cSv pour l'ensemble de la période de travail aux champs.

On a établi la relation entre l'importance de la contamination des sols par le césium 137 et la radioactivité de l'air dans la zone de travail. Selon les données de l'Institut de la santé au travail de Kiev, la radioactivité de l'air aux postes de travail atteignait 13,0 Bq/m³ lorsque le niveau de contamination du sol par le césium 137 était compris entre 7,0 et 30,0 Ci/km². Dans la région témoin, où la densité de la contamination se situait entre 0,23 et 0,61 Ci/km², la radioactivité de l'air aux postes de travail allait de 0,1 à 1,0 Bq/m³ (Krasnyuk, Chernyuk et Stezhka, 1993).

Les examens médicaux comparatifs des conducteurs de machines agricoles travaillant dans les zones contaminées et dans les zones saines ont révélé que les premiers souffraient davantage de maladies cardio-vasculaires, notamment de cardiopathie ischémique et de dystonie neurocirculatoire. D'autres troubles, tels que dysplasie de la glande thyroïde et monocytose, étaient également plus fréquents chez eux.

Les exigences en matière d'hygiène

Les horaires de travail

Lorsque des accidents importants surviennent dans des centrales nucléaires, des réglementations temporaires sont généralement adoptées pour protéger la population. Ce fut le cas à Tchernobyl, la valeur limite d'exposition étant fixée à 10 cSv pour une période d'un an. Si l'on part de l'hypothèse que les travailleurs reçoivent 50% de leur dose par irradiation externe dans le cadre de leur activité, cela signifie que le seuil d'intensité de la dose d'irradiation au cours de la journée de travail de huit heures ne devrait pas dépasser 2,1 mR/h.

Dans le travail agricole, l'intensité des rayonnements peut varier considérablement selon la concentration des substances radioactives dans le sol et les végétaux et, aussi, selon le type

Tableau 39.32 • Critères de délimitation des zones contaminées

Zones de contamination	Limites de contamination du sol	Doses limites	Types d'intervention
1. Zone interdite (30 km autour de la centrale)	—	—	La population est obligée de quitter les lieux et le travail agricole est interdit.
2. Evacuation obligatoire	15 Ci/km ² , césium 137 3 Ci/km ² , strontium 90 0,1 Ci/km ² , plutonium 239	0,5 cSv/an	Le travail agricole se fait par rotations de deux semaines, avec un contrôle radiologique rigoureux.
3. Evacuation volontaire	5-15 Ci/km ² , césium 137 0,15-3,0 Ci/km ² , strontium 90 0,01-0,1 Ci/km ² , plutonium 239	0,01-0,5 cSv/an	Des mesures sont prises pour réduire la contamination de la couche superficielle du sol; le travail agricole est soumis à un contrôle radiologique rigoureux.
4. Surveillance radioécologique	1-5 Ci/km ² , césium 137 0,02-0,15 Ci/km ² , strontium 90 0,05-0,01 Ci/km ² , plutonium 239	0,01 cSv/an	Le travail agricole se fait de façon habituelle, mais est soumis à un contrôle radiologique.

d'opérations (ensilage, préparation de fourrage sec, etc.). C'est donc la durée du travail agricole qu'il faut réglementer afin de réduire les doses absorbées.

La figure 39.12 illustre les règles adoptées à la suite de l'accident de Tchernobyl.

Les agrotechnologies

Il faut prendre des mesures rigoureuses de prévention de la contamination par la poussière pour les travaux agricoles effectués dans des zones où le sol et les végétaux sont fortement contaminés. Le chargement et le déchargement des matières sèches et poussiéreuses devraient être mécanisés; la goulotte de sortie du transporteur devrait être couverte de tissu. Les émissions de poussière doivent être réduites dans tous les types de travail aux champs.

En ce qui concerne le travail mécanisé, il faut tenir dûment compte de la pressurisation de la cabine et se déplacer dans la direction appropriée, de préférence perpendiculairement au vent. Il vaut mieux, si possible, arroser les champs avant de les cultiver. L'usage de technologies industrielles doit être privilégié afin d'éliminer le plus possible le travail manuel.

Enfin, il est recommandé d'appliquer sur le sol des produits qui favorisent l'absorption et la fixation des radionucléides pour en faire des composés insolubles, empêchant ainsi leur transfert aux végétaux.

Les machines agricoles

Les machines agricoles contaminées par des radionucléides constituent l'un des plus grands dangers pour la santé des travailleurs.

La durée admissible d'utilisation de ces machines dépend de l'intensité des rayonnements gamma émis par la surface des cabines. Il faut non seulement que la pressurisation des cabines soit suffisante, mais encore que les systèmes de ventilation et de conditionnement de l'air fonctionnent correctement. Une fois le travail terminé, il faut laver les cabines et remplacer les filtres.

Lorsqu'on entretient ou répare les machines après décontamination, l'intensité des rayonnements gamma émis par les surfaces extérieures ne devrait pas dépasser 0,3 mR/h.

Les bâtiments

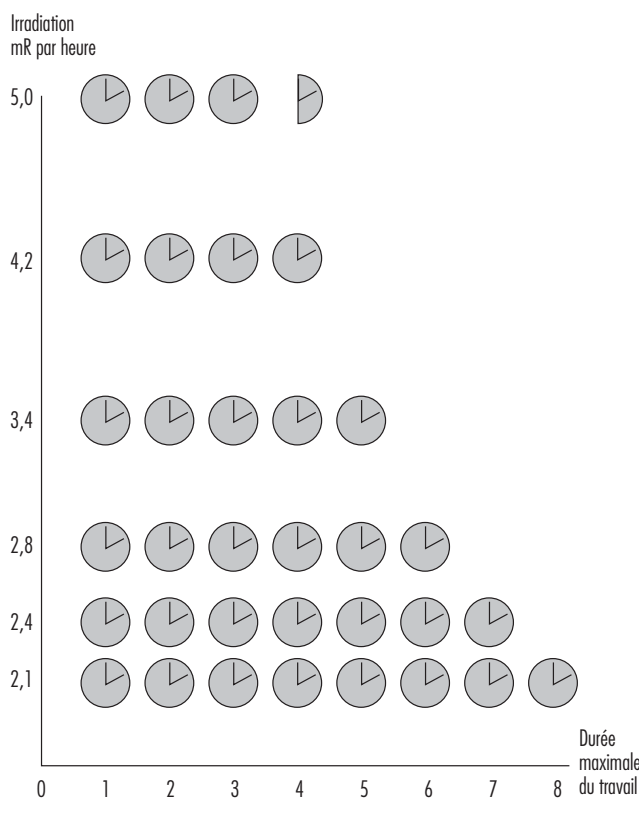
Les bâtiments devraient être lavés systématiquement tant à l'intérieur qu'à l'extérieur; ils devraient être dotés de douches. Lorsque l'on prépare du fourrage contenant des particules de poussière, il faut prendre des mesures pour prévenir leur inhalation par les travailleurs et dépoussiérer le sol, le matériel, etc.

La pressurisation des équipements devrait être vérifiée et les lieux de travail être munis d'un système de ventilation générale efficace.

L'utilisation de pesticides et d'engrais minéraux

L'application de pesticides sous forme de poudre et de granulés et d'engrais minéraux, ainsi que l'épandage par voie aérienne devraient être restreints. Il vaut mieux opter pour l'épandage et l'application à la machine de produits chimiques sous forme de granulés et d'engrais mixtes liquides. Les engrais minéraux en poudre devraient être entreposés et transportés uniquement dans des conteneurs hermétiquement fermés.

Figure 39.12 • Durée du travail agricole en fonction de l'intensité des rayonnements gamma sur les lieux de travail



On devrait porter un équipement de protection individuelle complet (salopette, casque, lunettes de protection, appareil de protection respiratoire, gants et bottes de caoutchouc) pour charger et décharger les produits, préparer les formulations liquides de pesticides et effectuer d'autres activités analogues.

L'approvisionnement en eau et l'alimentation

Les travailleurs devraient pouvoir prendre leurs repas dans des locaux ou des fourgons spéciaux fermés, à l'abri des courants d'air. Avant de manger, ils devraient nettoyer leurs vêtements et se laver à fond le visage et les mains à l'eau courante et au savon. En été, les travailleurs agricoles devraient être approvisionnés en eau potable conservée dans des récipients clos. Il faut éviter que de la poussière ne pénètre dans les récipients au moment de leur remplissage.

Les examens médicaux préventifs des travailleurs

Des examens médicaux périodiques devraient être pratiqués par un médecin et comporter obligatoirement une analyse du sang, un électrocardiogramme et des épreuves fonctionnelles respiratoires. Si l'intensité des rayonnements ionisants ne dépasse pas la limite admissible, les examens devraient se faire au moins tous les 12 mois. Si elle est plus forte, il faut augmenter la fréquence des contrôles (après les semailles, la récolte, etc.) en tenant compte de l'intensité des rayonnements aux postes de travail et de la dose totale absorbée.

L'organisation du contrôle radiologique dans les régions agricoles

Les principaux indicateurs de contamination à la suite de retombées radioactives sont l'intensité des rayonnements gamma dans la région, la contamination des terres agricoles par certains radionucléides et la teneur en radionucléides des produits agricoles.

Si l'on connaît l'intensité des rayonnements gamma, on peut délimiter les régions très contaminées, estimer les doses d'irradiation externe des travailleurs agricoles et établir des horaires propres à assurer la sécurité sur le plan radiologique.

Dans le secteur agricole, le contrôle radiologique relève généralement des laboratoires de radiologie du service sanitaire et des services vétérinaire et agrochimique. Ce sont ces laboratoires qui assurent la formation et l'éducation du personnel chargé du contrôle dosimétrique et des consultations de la population rurale.

● ÉTUDE DE CAS: L'INCENDIE DE LA FABRIQUE DE JOUETS KADER

Casey C. Grant

Un incendie tragique survenu dans une fabrique de jouets en Thaïlande a attiré l'attention du monde entier sur la nécessité d'adopter et d'appliquer des normes rigoureuses dans les entreprises industrielles de toutes catégories.

Le 10 mai 1993, un incendie de grande ampleur à la Kader Industrial (Thailand) Co. Ltd., dans la province de Nakhon Pathom, en Thaïlande, entraîna la mort de 188 travailleurs (Grant et Klem, 1994). De tous les incendies de bâtiments industriels, c'est celui qui a causé le plus grand nombre de pertes humaines accidentelles dans l'histoire récente, brisant en cela le triste record détenu pendant 82 ans par l'incendie de la manufacture Triangle Shirtwaist, à New York, qui avait fait en son temps 146 victimes (Grant, 1993). En dépit des années qui les séparent, ces deux catastrophes présentent des similitudes frappantes.

Plusieurs organismes nationaux et internationaux se sont penchés sur cet accident. Dans l'optique de la protection contre

l'incendie, l'Association nationale de protection contre l'incendie (National Fire Protection Association (NFPA)) des États-Unis et le Bureau international du travail (BIT), en collaboration avec les sapeurs-pompiers des services de police de Bangkok, se sont employés à établir les circonstances du sinistre.

La dimension internationale du problème

En Thaïlande, l'incendie de la Kader a focalisé l'attention sur les mesures de sécurité en vigueur dans le pays et, plus particulièrement, sur les exigences et l'application du code du bâtiment. Le Premier ministre thaïlandais, Chuan Leekpai, qui s'était rendu sur les lieux le soir même du drame, a déclaré que le gouvernement était résolu à revoir l'ensemble du dispositif de sécurité en matière d'incendie. Selon le *Wall Street Journal* (1993), Leekpai a également réclamé des mesures sévères contre tous ceux qui enfreignent les lois en matière de sécurité, tandis que le ministre de l'Industrie, Sanan Kachornprasart, déclarait pour sa part que «les entreprises qui n'ont pas de systèmes de prévention des incendies seront tenues d'en installer un ou devront fermer leurs portes».

Toujours selon le *Wall Street Journal*, si l'on estimait alors, dans les milieux syndicaux et officiels et parmi les experts de la sécurité, que l'incendie de la Kader devait donner lieu à un durcissement des normes de construction et des règles de sécurité, le pays n'était toutefois pas à la veille de réaliser des progrès durables en ce sens, étant donné le laxisme des employeurs à l'égard de la réglementation et la priorité accordée à la croissance économique au détriment de la sécurité des travailleurs.

Comme la Kader Industrial (Thailand) Co. Ltd. appartient majoritairement à des intérêts étrangers, l'incendie a également suscité un débat international sur les responsabilités des investisseurs étrangers à l'égard de la sécurité des travailleurs thaïlandais. En fait, le capital de la Kader est détenu par des investisseurs de Taiwan et de Hong-kong, Chine, à hauteur respectivement de 20% et de 79,96%, tandis que 0,04% seulement des parts est entre les mains de Thaïlandais.

Avec la mondialisation de l'économie, la localisation de la production est désormais dissociée des marchés de consommation. Il ne faudrait pas que le souci de rester compétitif dans ce nouvel environnement conduise à négliger les règles de sécurité élémentaires en vigueur dans l'industrie en matière de prévention des incendies. Tous les travailleurs, dans tous les pays, doivent pouvoir bénéficier d'une protection adéquate dans ce domaine: la leur assurer est une obligation morale pour toutes les parties concernées.

La fabrique Kader

La fabrique Kader produisait des jouets en plastique et des poupées en peluche ou en laine destinés essentiellement au marché des États-Unis et d'autres pays développés; elle est située dans le district de Sam Phran de la province de Nakhon Pathom, à peu près à mi-chemin entre Bangkok et la ville voisine de Kanchanaburi, site du tristement célèbre pont de la rivière Kwai érigé pendant la seconde guerre mondiale.

Toutes les structures détruites dans le brasier appartenaient directement à la Kader, également propriétaire du terrain. La Kader a deux sociétés sœurs, elles aussi implantées sur le même site en vertu d'un contrat de location.

La Kader Industrial (Thailand) Co. Ltd. avait été enregistrée pour la première fois le 27 janvier 1989, mais la licence de l'entreprise avait été suspendue le 21 novembre 1989, après qu'un incendie survenu le 16 août 1989 eut détruit la fabrique. Le feu avait pris naissance dans du polyester utilisé par une machine à filer pour fabriquer des poupées. Le ministre de l'Industrie avait alors permis à l'usine reconstruite de rouvrir ses portes le 4 juillet 1990.

La fabrique a connu plusieurs feux de moindre importance entre le moment de sa réouverture et l'incendie de mai 1993.

L'un d'eux, survenu en février 1993, avait causé d'énormes dommages au bâtiment 3, qui était encore en réparation au moment de l'incendie de mai 1993. L'incendie de février s'était déclaré tard en soirée dans un local d'entreposage de polyester et de coton. Plusieurs jours après l'incident, un inspecteur s'était rendu sur les lieux et avait signalé à l'entreprise qu'elle devait se doter d'un système d'inspection des installations, de matériel de sécurité et d'un plan d'intervention.

Selon les premiers rapports sur l'incendie de mai 1993, la fabrique comptait quatre bâtiments, dont trois ont été détruits par les flammes. Ce n'est pas inexact, mais les trois bâtiments en question formaient en fait une seule structure en forme de E (voir figure 39.13) dont les différentes parties portaient respectivement le nom de bâtiment 1, 2 et 3. Il y avait à proximité un atelier d'un seul niveau et une autre structure à quatre niveaux appelée bâtiment 4.

Le bâtiment en E était une construction sur quatre niveaux composée d'une ossature métallique et de dalles de béton, avec des fenêtres sur les quatre côtés à chaque étage et un toit en double pente de faible inclinaison. Chacune des parties de cette structure comportait un monte-charge grillagé et deux cages d'escalier de 1,5 m de large.

Chaque bâtiment était muni d'un système d'alarme incendie. Il n'y avait pas d'extincteurs automatiques, mais des extincteurs portatifs et des robinets d'incendie étaient installés sur les murs extérieurs et dans les cages d'escalier. Aucun élément de la charpente métallique n'était protégé par un matériau ignifuge.

Des données contradictoires ont circulé sur le nombre total de travailleurs qui se trouvaient sur place. La Fédération des industries thaïlandaises s'était engagée à venir en aide à 2 500 employés touchés par l'incendie, mais on ne sait pas exactement combien d'employés se trouvaient en même temps sur le site. Au moment de l'incendie, on a déclaré qu'il y avait 1 146 travailleurs dans le bâtiment 1: 36 au rez-de-chaussée, 10 au premier étage, 500 au deuxième et 600 au troisième. Il y avait 405 travailleurs dans le bâtiment 2: 60 au rez-de-chaussée, 5 au premier étage, 300 au deuxième et 40 au troisième. On ne connaît pas le nombre exact de travailleurs qui se trouvaient dans le bâtiment 3, car il était partiellement en réparation. Les travailleurs de l'usine étaient pour la plupart des femmes.

L'incendie

Le lundi 10 mai 1993 était un jour de travail normal. Vers 16 heures, comme le poste de jour tirait à sa fin, on découvrit un petit feu au rez-de-chaussée près de l'extrémité sud du bâtiment 1. Comme ce lieu servait à emballer et à entreposer les produits finis, il contenait une charge combustible considérable (voir figure 39.14). Chaque bâtiment avait une charge combustible composée de tissus, de plastiques et de matériaux de rembourrage, en plus du matériel habituellement présent sur tout lieu de travail.

Les gardes chargés de la sécurité qui se trouvaient à proximité ont tenté en vain d'éteindre les flammes avant d'appeler les sapeurs-pompiers de la police locale à 16 h 21. Les autorités ont reçu deux autres appels, à 16 h 30 et à 16 h 31. Bien que la fabrique soit située juste au-delà des limites administratives de Bangkok, les services d'incendie de la ville sont intervenus avec ceux de la province de Nakhon Pathom.

Pendant que les travailleurs et les gardes tentaient en vain d'éteindre les flammes, le bâtiment a commencé à se remplir de fumée et d'autres produits de combustion. Des survivants ont déclaré que l'alarme incendie n'avait jamais sonné dans le bâtiment 1, mais que la vue de la fumée aux étages supérieurs avait alerté de nombreux travailleurs. Malgré la fumée, il semble que des gardes aient demandé à certains d'entre eux de rester à leur poste, en leur expliquant que l'incendie serait rapidement maîtrisé.

Le feu s'est rapidement propagé dans l'ensemble du bâtiment 1, tandis que l'air devenait irrespirable aux étages supérieurs. L'escalier situé à l'extrémité sud du bâtiment étant bloqué par le brasier, la plupart des travailleurs se sont rués vers celui de l'extrémité nord. C'est donc dire qu'environ 1 100 personnes ont tenté de quitter les deuxième et troisième étages par un seul escalier.

Le premier engin d'incendie n'est arrivé qu'à 16 h 40, en raison à la fois de l'éloignement relatif de l'usine et de la circulation toujours très dense à Bangkok. A leur arrivée, les sapeurs-pompiers ont constaté que le bâtiment 1, déjà largement pris dans les flammes, commençait à s'écrouler et que des gens sautaient des deux derniers étages.

Malgré leurs efforts, le bâtiment 1 s'est complètement effondré vers 17 h 14. Attisé par les forts vents qui soufflaient vers le nord, le feu s'est rapidement étendu aux bâtiments 2 et 3 avant que les sapeurs-pompiers ne parviennent à les protéger. D'après les rapports, le bâtiment 2 s'est écroulé à 17 h 30, et le bâtiment 3, à 18 h 05. Les sapeurs-pompiers ont réussi à empêcher que les flammes ne gagnent le bâtiment 4 et l'atelier plus petit, composé d'un simple rez-de-chaussée, qui se trouvait à proximité. Vers 19 h 45, le brasier était maîtrisé. Une cinquantaine d'engins d'incendie ont pris part à l'intervention.

Les alarmes incendie des bâtiments 2 et 3 ont, semble-t-il, bien fonctionné, et toutes les personnes qui y travaillaient ont pu s'échapper. Les travailleurs du bâtiment 1 n'ont pas eu cette chance. Un grand nombre d'entre eux ont sauté des étages supérieurs. Au total, 469 travailleurs ont été hospitalisés; 20 d'entre eux sont décédés. Les autres victimes ont été retrouvées au cours des recherches menées après l'incendie dans ce qui avait été l'escalier nord du bâtiment. Bon nombre d'entre elles avaient succombé à des produits de combustion létaux avant ou pendant l'effondrement du bâtiment. Selon les dernières données, 188 personnes, pour la plupart des femmes, sont mortes au cours ou à la suite de cet incendie.

Il a fallu plusieurs jours pour retirer tous les corps des décombres, même avec l'aide de six grands appareils de levage transportés sur les lieux pour faciliter les recherches. Il n'y a pas eu de morts chez les sapeurs-pompiers, mais un seul blessé.

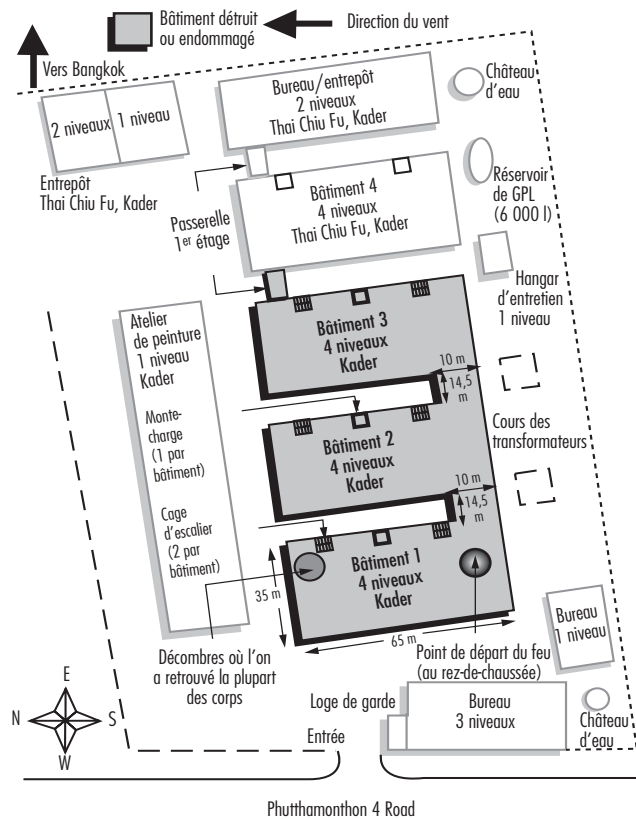
La circulation dans les environs, généralement difficile, a ralenti le transport des victimes vers les hôpitaux. Près de 300 travailleurs blessés ont été conduits à l'hôpital voisin Sriwichai II, mais bon nombre d'entre eux ont dû être transférés dans d'autres centres médicaux, cet hôpital n'étant plus en mesure de faire face à de nouvelles arrivées.

Le lendemain de l'incendie, l'hôpital Sriwichai II avait admis 111 victimes, l'hôpital Kasemrat, 120, le Sriwichai Pattanana, 60, le Sriwichai I, 50, le Ratanathibet I, 36, le Siriraj, 22 et le Bang Phai, 17; 53 autres blessés avaient été orientés vers divers établissements hospitaliers de la région. Au total, 22 hôpitaux de Bangkok et de la province de Nakhon Pathom sont intervenus à la suite de la catastrophe.

La direction de l'hôpital Sriwichai II a précisé que 80% des 111 victimes admises souffraient de blessures graves, justifiant une intervention chirurgicale dans 30% des cas. La moitié des patients avaient simplement inhalé de la fumée, tandis que les autres souffraient également de brûlures et de fractures diverses. Au moins 10% des travailleurs blessés admis à l'hôpital Sriwichai II risquaient de demeurer paralysés.

Il n'a pas été possible d'établir avec certitude la cause de l'incendie, la partie de l'usine dans laquelle il avait pris naissance ayant été entièrement détruite. En outre, les survivants ont fourni des informations contradictoires. Comme le feu s'était déclaré près d'un grand panneau électrique de distribution, les enquêteurs ont d'abord pensé qu'une défaillance du circuit électrique pouvait être en cause. Ils ont également envisagé une origine criminelle. Les autorités thaïlandaises estiment toutefois, à l'heure actuelle,

Figure 39.13 • Plan de situation de la fabrique de jouets Kader



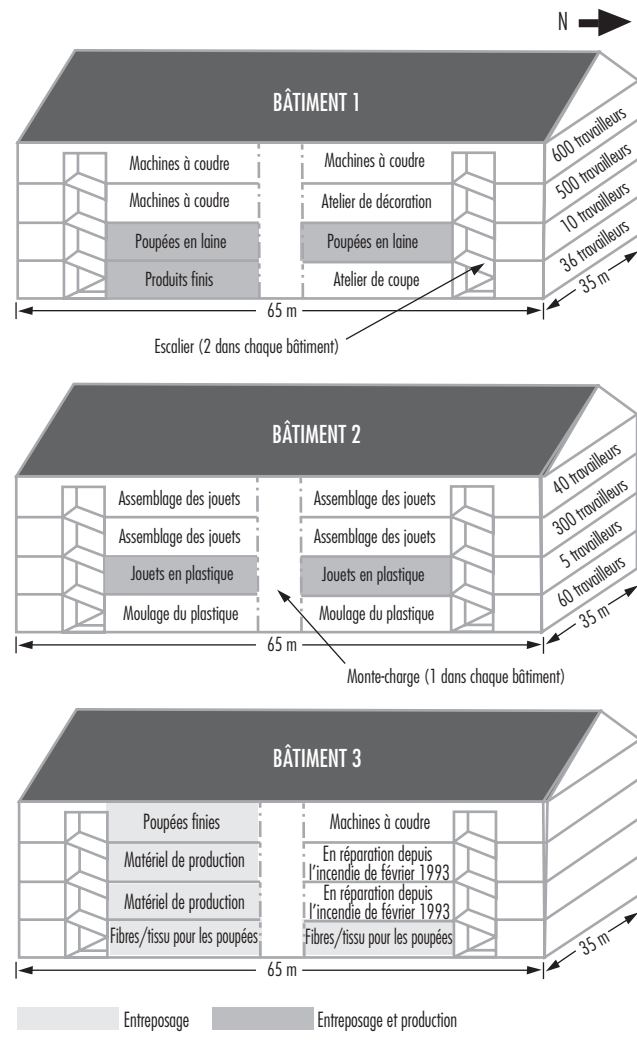
gaz ou la panique pouvant survenir au cours d'une évacuation ou pendant le déroulement des secours.

Le code exige aussi que chaque bâtiment ait suffisamment de sorties et d'autres dispositifs de sécurité de capacité suffisante et bien placés pour permettre à tous ses occupants de s'échapper. Ces sorties devraient être adaptées au bâtiment, compte tenu de sa destination, du nombre et des capacités de ses occupants, de la hauteur et du type d'immeuble, des services de protection incendie disponibles et des autres éléments intéressant la sécurité de ses occupants. Ce n'était manifestement pas le cas à l'usine Kader, où les flammes ont bloqué l'une des deux cages d'escalier du bâtiment 1, forçant quelque 1 100 personnes à s'échapper des deuxième et troisième étages par un seul escalier.

Les sorties devraient toujours être disposées et entretenues de façon à permettre aux occupants de quitter sans difficulté, à tout moment, n'importe quelle partie d'un bâtiment. Chacune d'elles devrait être bien visible, et la voie à suivre indiquée de façon parfaitement claire.

Toutes les ouvertures ménagées dans les planchers du bâtiment devraient être fermées ou protégées afin d'assurer une sécurité raisonnable aux occupants qui sortent et d'empêcher l'incendie, la

Figure 39.14 • Organisation intérieure des bâtiments 1, 2 et 3



qu'une cigarette jetée par mégarde pourrait avoir été à l'origine du sinistre.

L'analyse de l'incendie

La comparaison de cet incendie avec celui de la Triangle Shirtwaist, survenu à New York en 1911, fournit des repères précieux pour l'analyse. Les deux bâtiments présentaient plusieurs similitudes: sorties déficientes, systèmes fixes de protection contre l'incendie insuffisants ou inefficaces, charge combustible initiale facilement inflammable et coupe-feu horizontaux et verticaux inadéquats. De plus, les deux entreprises n'avaient pas donné une formation suffisante à leur personnel en matière de sécurité incendie. Une différence cependant distingue nettement ces deux sinistres: le bâtiment de la Triangle Shirtwaist ne s'est pas effondré, contrairement à celui de la fabrique Kader.

Le mauvais aménagement des sorties est peut-être le facteur qui a le plus largement contribué au nombre élevé de pertes en vies humaines aussi bien dans l'incendie de la Kader que dans celui de la Triangle Shirtwaist. Si la fabrique Kader avait appliqué les dispositions relatives aux sorties du *Life Safety Code* (règlement NFPA 101), rédigé immédiatement après l'incendie de New York, le bilan de la catastrophe de 1993 aurait été beaucoup moins lourd (NFPA, 1994).

Plusieurs prescriptions de base du *Life Safety Code* s'appliquent directement à l'incendie de la Kader. Ainsi, le code exige que tous les ouvrages et tous les bâtiments soient construits, aménagés et exploités de façon que leurs occupants ne soient pas exposés à des dangers inacceptables causés par un incendie, de la fumée, des

39. LES CATASTROPHES NATURELLES ET TECHNOLOGIQUES

fumée et les gaz de se propager d'un étage à l'autre avant que les occupants n'aient eu la possibilité de s'échapper.

L'absence de séparations coupe-feu horizontales et verticales adéquates a largement influé sur l'issue des incendies de la Triangle Shirtwaist et de la Kader. Les deux fabriques avaient été construites et aménagées de telle sorte qu'un feu prenant naissance à un niveau inférieur pouvait se propager rapidement aux étages supérieurs, prenant ainsi un grand nombre de travailleurs au piège.

Les bâtiments industriels comportent très souvent des aires de travail vastes et ouvertes. Ils doivent être équipés de planchers et de murs résistant au feu pour ralentir la propagation des flammes d'un secteur à l'autre. Il faut aussi empêcher le feu de se propager d'un étage à l'autre par les fenêtres, comme ce fut le cas dans l'incendie de la Triangle Shirtwaist.

Le meilleur moyen de limiter la propagation verticale du feu et de la fumée est de prévoir des cages autour des escaliers, des monte-charge et des ouvertures verticales ménagées entre les étages. De ce point de vue, la présence dans l'usine Kader de monte-charge grillagés, signalée par les rapports, suscite de sérieux doutes.

La formation et l'équipement en matière de sécurité incendie

L'absence de formation adéquate en matière de lutte contre le feu et la rigidité des consignes de sécurité des deux fabriques — celle de la Triangle Shirtwaist comme celle de la Kader — sont deux autres facteurs responsables des pertes élevées en vies humaines.

Après l'incendie de la Kader, des survivants ont signalé que les exercices pratiques et la formation en matière de sécurité incendie et de lutte contre le feu étaient réduits au minimum, et que seuls les gardes chargés de la sécurité semblaient en connaître les rudiments. La Triangle Shirtwaist, quant à elle, n'avait pas de plan d'évacuation et n'organisait pas d'exercices d'incendie. Des survivants de cette entreprise ont indiqué qu'on les arrêtait systématiquement pour les soumettre à des contrôles de sécurité lorsqu'ils quittaient le bâtiment à la fin de leur journée de travail. Certains ont accusé le dispositif de sécurité de la Kader d'avoir ralenti l'évacuation, mais toute la lumière n'a pas encore été faite sur la question. Quoi qu'il en soit, l'absence de plan d'évacuation clairement établi semble avoir largement contribué au lourd bilan de l'incendie de la Kader (le chapitre 31 du *Life Safety Code* porte précisément sur les exercices d'incendie et la formation relative à l'évacuation).

L'absence de systèmes fixes et automatiques de protection contre l'incendie et de lutte contre le feu a également influé sur l'ampleur du sinistre dans les deux fabriques. Aucune d'elles ne possédait de système d'extinction automatique, mais la Kader disposait d'une installation d'alarme incendie. Selon le *Life Safety Code*, on devrait installer des alarmes incendie dans tout bâtiment dont la taille, l'aménagement ou la destination sont tels que les occupants ne peuvent se rendre compte immédiatement par eux-mêmes de la présence d'un incendie naissant. Il semble malheureusement que l'alarme ne se soit pas déclenchée dans le bâtiment 1 de la Kader, ce qui a beaucoup retardé l'évacuation. Par contre, on n'a déploré aucun mort dans les bâtiments 2 et 3, où les systèmes d'alarme ont fonctionné comme prévu.

Les systèmes d'alarme et d'extinction devraient être conçus, installés et entretenus conformément à des règlements comme le *National Fire Alarm Code*, en l'occurrence le NFPA 72 (NFPA, 1993), le NFPA 13 (NFPA, 1994a) et le NFPA 25 (NFPA, 1995).

La charge combustible initiale était la même dans l'incendie de la Triangle Shirtwaist et dans celui de la Kader. Dans le premier cas, le feu s'est déclaré dans des caisses à chiffons et s'est propagé rapidement à des vêtements puis à des meubles en bois, dont certains étaient imprégnés d'huile de machine. L'incendie de la

Kader a pris naissance dans du polyester, du coton, diverses matières plastiques et des tissus servant à fabriquer des jouets en plastique ou en peluche et d'autres articles du même genre. Toutes ces matières s'enflamment aisément, favorisent la propagation rapide des flammes et dégagent beaucoup de chaleur.

On mettra probablement toujours en œuvre, dans l'industrie, des matières présentant un risque d'incendie important, mais les exploitants devraient être conscients des risques inhérents à ces matières et prendre les précautions nécessaires pour réduire au minimum les dangers qui en découlent.

L'intégrité structurelle des bâtiments

La différence la plus importante entre les deux incendies tient aux effets constatés sur l'intégrité structurelle des bâtiments sinistrés. En effet, même si l'incendie de la Triangle Shirtwaist a détruit les trois étages supérieurs du bâtiment qui en comptait dix, la structure est demeurée intacte. Les bâtiments de la Kader, par contre, se sont effondrés assez rapidement parce que la charpente métallique n'était pas revêtue d'un matériau ignifuge qui lui aurait permis de résister à des températures élevées, ainsi que l'a révélé l'examen ultérieur des décombres.

Il va de soi que l'effondrement d'un bâtiment au cours d'un incendie met grandement en péril les occupants et les sapeurs-pompiers. Dans le cas de la Kader, on ignore cependant si cela a eu un impact direct sur le nombre de morts, car les victimes avaient peut-être déjà succombé aux effets de la chaleur et des produits de combustion. Si les travailleurs des étages supérieurs du bâtiment 1 avaient été protégés des produits de combustion et de la chaleur pendant qu'ils tentaient de sortir, l'effondrement aurait contribué aux pertes humaines de manière directe.

Rappel de quelques principes de protection contre l'incendie

L'incendie de la Kader a attiré plus particulièrement l'attention sur certains principes de protection contre l'incendie, parmi lesquels la conception des voies d'évacuation, la formation des occupants, les systèmes automatiques de détection des incendies et de lutte contre le feu, les portes coupe-feu et l'intégrité structurelle des constructions. Ces principes ne sont pas nouveaux; ils ont été énoncés pour la première fois il y a plus de 80 ans, après l'incendie de la Triangle Shirtwaist, et rappelés plus récemment à l'occasion de plusieurs incendies graves en milieu de travail: celui de l'usine de transformation du poulet à Hamlet (Caroline du Nord), qui a entraîné la mort de 25 travailleurs; celui d'une fabrique de poupées à Kuyong (Chine), qui a fait 81 victimes; et celui de la centrale électrique de Newark (New Jersey), où les 3 employés présents sur les lieux ont trouvé la mort (Grant et Klem, 1994; Klem, 1992; Klem et Grant, 1993).

Les incendies de la Caroline du Nord et du New Jersey, en particulier, montrent qu'il ne suffit pas de disposer des normes et des codes les plus perfectionnés, comme le *Life Safety Code* de la NFPA (NFPA, 1994b) pour prévenir des pertes tragiques. Encore faut-il les mettre en œuvre et les appliquer avec rigueur pour leur donner effet.

A tous les niveaux de l'administration, les autorités devraient s'interroger sur l'application des codes en vigueur en matière de construction des bâtiments et de prévention des incendies afin d'établir s'il y a lieu de les mettre à jour ou d'en adopter de nouveaux. Elles devraient aussi déterminer si elles disposent d'un mécanisme approprié d'examen et d'inspection des plans de construction permettant de vérifier leur conformité aux règles pertinentes. Elles devraient enfin veiller à ce que les bâtiments existants fassent l'objet d'inspections périodiques en vue d'assurer à tout moment un niveau maximal de sécurité.

Les propriétaires de bâtiments et les exploitants devraient être conscients du fait qu'ils ont la responsabilité d'assurer un environ-

nement de travail sûr à leur personnel. Ils devraient, à tout le moins, prendre les mesures de protection contre l'incendie prévues par les codes et les normes de sécurité les plus récents, afin de réduire au minimum les risques de catastrophe.

Si les bâtiments de l'usine Kader avaient été munis d'extincteurs automatiques et d'alarmes incendie en bon état, les pertes n'auraient sans doute pas été aussi lourdes. Si les sorties du bâtiment 1 avaient été mieux conçues, des centaines de personnes ne se seraient probablement pas blessées en sautant des deuxième et troisième étages. Si des séparations coupe-feu verticales et horizontales avaient été en place, le feu ne se serait sans doute pas propagé aussi rapidement dans l'ensemble du bâtiment. Enfin, si l'ossature métallique avait été ignifugée, les bâtiments ne se seraient peut-être pas effondrés.

Le philosophe George Santayana a écrit : «Ceux qui oublient le passé sont condamnés à le revivre.» L'incendie survenu chez Kader en 1993 fut malheureusement, à bien des égards, une réplique de celui de la Triangle Shirtwaist en 1911. Confrontée à son avenir, la société tout entière doit tout faire pour prévenir le retour des catastrophes.

● LES CONSÉQUENCES DES CATASTROPHES: ENSEIGNEMENTS À TIRER DU POINT DE VUE MÉDICAL

*José Luis Zeballos**

L'Amérique latine et les Caraïbes ont eu leur part de catastrophes naturelles. Presque chaque année, des cataclysmes causent des morts, des blessés et d'énormes dommages matériels. On estime globalement que les grandes catastrophes naturelles survenues dans cette région au cours des deux dernières décennies ont fait quelque 500 000 blessés et 150 000 morts, et engendré des pertes matérielles pour près de 8 millions de personnes. Ces chiffres proviennent pour la plupart de sources officielles (il est très difficile d'obtenir des renseignements exacts sur les catastrophes soudaines; si les sources d'information abondent, il n'existe par contre aucun système de collecte de données uniformisé). La Commission économique des Nations Unies pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPALC) estime que les cataclysmes qui frappent cette région du monde coûtent chaque année, en moyenne, 1,5 milliard de dollars E.-U. et causent 6 000 décès (Jovel, 1991).

Le tableau 39.33 dresse la liste des grandes catastrophes naturelles qui ont touché divers pays de la région entre 1970 et 1993. Il importe de noter que les catastrophes d'installation lente, comme les sécheresses et les inondations, ne sont pas prises en compte.

Les conséquences économiques

Au cours des dernières décennies, la CEPALC a effectué de nombreuses recherches sur les conséquences sociales et économiques des catastrophes. Ces travaux ont clairement démontré que celles-ci ont des effets négatifs sur le développement économique et social des pays en développement. En effet, les pertes financières engendrées par une catastrophe majeure dépassent souvent le produit national brut total. Il n'est donc pas étonnant que ces événements soient à même de paralyser des pays entiers et de créer de graves perturbations politiques et sociales.

Les catastrophes ont en général trois types de conséquences économiques:

* Cet article est adapté de Zeballos (1993b), avec l'autorisation de l'auteur.

- des conséquences directes sur les biens de la population touchée;
- des conséquences indirectes liées aux pertes de production de biens et de services;
- des conséquences secondaires qui n'apparaissent qu'après la catastrophe, telles que réduction du revenu national, hausse de l'inflation, perturbations du commerce extérieur, augmentation des charges financières, déficit budgétaire, diminution des réserves monétaires, etc. (Jovel, 1991).

Le tableau 39.34 indique les pertes estimatives causées par six grandes catastrophes naturelles. Ces pertes, qui peuvent ne pas sembler particulièrement lourdes pour des pays développés et prospères ont, en revanche, des effets graves et prolongés sur les économies faibles et vulnérables des pays en développement (OPS, 1989).

L'infrastructure sanitaire

Dans toute situation d'urgence liée à une catastrophe majeure, la priorité absolue est de sauver des vies et de secourir immédiatement les blessés. Parmi les services médicaux d'urgence mobilisés à cette fin, les hôpitaux jouent un rôle clé. Dans les pays qui possèdent un système d'intervention intégré (où le concept de «services médicaux d'urgence» implique la coordination de sous-systèmes indépendants, tels que services d'ambulance, sapeurs-pompier et équipes de secours), ils constituent en fait le pilier de ce système (OPS, 1989).

Les hôpitaux et autres centres de soins sont des lieux très fréquentés. Ils accueillent des patients, du personnel et des visiteurs et fonctionnent 24 heures sur 24. Les patients peuvent être traités au moyen d'équipements spéciaux ou reliés à des systèmes de maintien des fonctions vitales alimentés à l'électricité. Selon des dossiers de projets fournis par la Banque interaméricaine de développement (BID) (communication personnelle, Tomas Engler, BID), le coût estimatif d'un lit d'hôpital dans un centre spécialisé varie d'un pays à l'autre, mais il se situe en moyenne entre 60 000 et 80 000 dollars E.-U.; il est encore plus élevé dans les unités de soins très spécialisés. Aux Etats-Unis, en Californie en particulier où l'on possède une vaste expérience en génie parasismique, le coût d'un lit d'hôpital peut dépasser 110 000 dollars. Bref, les hôpitaux modernes sont des ensembles très complexes qui font à la fois office d'hôtels, de bureaux, de laboratoires et d'entrepôts (Peisert, Cross et Riggs, 1984; FEMA, 1990).

Ces centres de soins sont très vulnérables face aux ouragans et aux tremblements de terre, ainsi que l'expérience de l'Amérique latine et des Caraïbes l'a amplement démontré. Comme l'indique le tableau 39.35, 3 catastrophes survenues dans les années quarante ont, à elles seules, endommagé 40 de ces établissements et entraîné la perte de 11 332 lits d'hôpital en El Salvador, à la Jamaïque et au Mexique, sans compter les pertes en vies humaines (y compris parmi le personnel local hautement qualifié) (voir tableaux 39.36 et 39.37).

A l'heure actuelle, de nombreux hôpitaux d'Amérique latine ne sont pas assurés de pouvoir résister à un tremblement de terre. Ils occupent le plus souvent de vieux bâtiments dont certains datent de l'époque de la colonisation espagnole. Et, même si beaucoup d'autres sont situés dans des bâtiments modernes à l'architecture séduisante, le laxisme avec lequel les codes du bâtiment sont appliqués soulève des doutes quant à leur capacité de résister à un tremblement de terre.

Les facteurs de risque liés aux tremblements de terre

De tous les types de catastrophes naturelles soudaines, ce sont, de loin, les tremblements de terre qui causent le plus de dommages aux hôpitaux. Chaque tremblement de terre présente des caractéristiques propres en ce qui concerne l'épicentre, le type d'ondes

Tableau 39.33 • Catastrophes majeures survenues en Amérique latine et dans les Caraïbes, 1970-1993

Année	Pays	Type de catastrophe	Nombre de décès signalés	Nombre estimatif de victimes
1970	Pérou	Tremblement de terre	66 679	3 139 000
1972	Nicaragua	Tremblement de terre	10 000	400 000
1976	Guatemala	Tremblement de terre	23 000	1 200 000
1980	Haïti	Cyclone (Allen)	220	330 000
1982	Mexique	Eruption volcanique	3 000	60 000
1985	Mexique	Tremblement de terre	10 000	60 000
1985	Colombie	Eruption volcanique	23 000	200 000
1986	El Salvador	Tremblement de terre	1 100	500 000
1988	Jamaïque	Cyclone (Gilbert)	45	500 000
1988	Mexique	Cyclone (Gilbert)	250	200 000
1988	Nicaragua	Cyclone (Joan)	116	185 000
1989	Montserrat, Dominique	Cyclone (Hugo)	56	220 000
1990	Pérou	Tremblement de terre	21	130 000
1991	Costa Rica	Tremblement de terre	51	19 700
1992	Nicaragua	Tsunami	116	13 500
1993	Honduras	Tempête tropicale	103	11 000

Source: OPS, 1989; USAID, 1989; UNDRO, 1990.

sismiques, la nature géologique du sous-sol qui transmet ces ondes, etc. Toutefois, les études ont permis d'identifier certains facteurs communs qui tendent à occasionner des pertes ou, inversement, à les prévenir ou à les limiter: paramètres structurels des constructions, comportement et habitudes des populations, caractéristiques des équipements non structurels, de l'ameublement et des autres éléments se trouvant à l'intérieur des bâtiments.

Ces dernières années, chercheurs et planificateurs se sont particulièrement attachés à cerner les facteurs de risque pour les hôpitaux en vue d'améliorer les normes régissant la construction et l'aménagement de ces établissements dans les zones très vulnérables. Une brève liste des facteurs de risque pertinents figure au tableau 39.38. Il a été observé que ces facteurs, en particulier ceux qui ont trait aux aspects structurels, avaient influé sur les profils de destruction établis au cours du tremblement de terre survenu en

décembre 1988 en Arménie, qui a fait quelque 25 000 morts et 1 100 000 sinistrés et a détruit ou gravement endommagé 377 écoles, 560 centres de santé et 324 centres communautaires et culturels (USAID, 1989).

Des dommages d'ampleur comparable ont été enregistrés en juin 1990, en Iran, au cours d'un tremblement de terre qui s'est soldé par environ 40 000 tués, 60 000 blessés et 500 000 sans-abri et la destruction de 60 à 90% des bâtiments dans les zones touchées (UNDRO, 1990).

Pour étudier ce genre de cataclysmes, un colloque international s'est tenu à Lima (Pérou) en 1989; il a examiné la planification, la conception, la remise en état et la gestion des hôpitaux dans les zones exposées aux tremblements de terre. Parrainé par l'Organisation panaméricaine de la santé (OPS), l'Université nationale d'ingénieurs du Pérou et le Centre nippono-péruvien de recherche sismique (CISMID), ce colloque a réuni des architectes, des ingénieurs et des administrateurs d'hôpitaux pour étudier diverses questions concernant les centres de santé implantés dans des zones sujettes aux séismes. Les travaux ont débouché sur un ensemble de recommandations techniques et d'engagements portant sur l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures hospitalières, l'amélioration de la conception des nouveaux centres et l'élaboration de mesures de sécurité pour les hôpitaux existants, particulièrement ceux qui sont situés dans des zones à risque sismique élevé (CISMID, 1989).

Les recommandations pour la préparation des établissements hospitaliers aux catastrophes

Comme on peut l'imaginer au vu de ce qui précède, la préparation des hôpitaux aux catastrophes occupe une grande place dans les activités du Service d'organisation des interventions et de l'aide d'urgence (Office of Emergency Preparedness and Disaster Relief) de l'OPS. Au cours des dix dernières années, ce service a incité les pays membres à prendre diverses mesures à cet égard, et notamment:

- classer les hôpitaux selon leurs facteurs de risque et leur vulnérabilité;
- élaborer des plans d'intervention internes et externes pour les hôpitaux et former le personnel hospitalier en conséquence;

Tableau 39.34 • Pertes imputables à six catastrophes naturelles

Catastrophe	Lieu	Année(s)	Total des pertes (en millions de dollars E.-U.)
Tremblement de terre	Mexique	1985	4 337
Tremblement de terre	El Salvador	1986	937
Tremblement de terre	Equateur	1987	1 001
Eruption volcanique (Nevado del Ruiz)	Colombie	1985	224
Inondation, sécheresse («El Niño»)	Pérou, Equateur, Bolivie	1982-1983	3 970
Cyclone (Joan)	Nicaragua	1988	870

Source: OPS, 1989; CEPALC.

Tableau 39.35 • Nombre d'hôpitaux et de lits d'hôpitaux endommagés ou détruits par trois catastrophes naturelles majeures

Type de catastrophe	Nombre d'hôpitaux endommagés ou détruits	Nombre de lits perdus
Tremblement de terre, Mexique (District Fédéral, septembre 1985)	13	4 387
Tremblement de terre, Salvador (San Salvador, octobre 1986)	4	1 860
Cyclone Gilbert (Jamaïque, septembre 1988)	23	5 085
Total	40	11 332

Source: OPS, 1989; USAID, 1989; CEPALC.

- élaborer des plans d'intervention et des consignes de sécurité pour le personnel médical et les techniciens des hôpitaux;
- renforcer les systèmes de secours afin de permettre aux hôpitaux de fonctionner en situation d'urgence.

De façon plus générale, l'un des principaux objectifs de la Décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles (DIPCN) qui s'est terminée en décembre 1999 est de sensibiliser les autorités sanitaires et les dirigeants des différents pays au rôle des services de santé appelés à intervenir en cas de catastrophe, et de les inciter à renforcer ces services dans les pays en développement.

Les questions liées aux accidents technologiques

Depuis une vingtaine d'années, les pays en développement se livrent une concurrence acharnée dans une course à l'industrialisation dont les enjeux sont:

- attirer des investissements productifs et créer des emplois;
- répondre à la demande nationale de produits à moindre coût et réduire la dépendance vis-à-vis des marchés extérieurs;
- concurrencer les marchés internationaux et sous-régionaux;
- établir les bases d'un développement durable.

Malheureusement, les efforts déployés n'ont pas toujours produit les résultats escomptés. En effet, la souplesse dont on a fait preuve pour attirer les investisseurs, l'absence de réglementation rigoureuse en matière de sécurité industrielle et de protection de l'environnement, la négligence dans l'exploitation des installations

Tableau 39.36 • Victimes de l'effondrement de deux hôpitaux au cours du tremblement de terre de 1985 au Mexique

	Hôpital général		Hôpital de Ciudad Juárez	
	Nombre	%	Nombre	%
Décès	295	62,6	561	75,8
Sauvetages	129	27,4	179	24,2
Disparitions	47	10,0	—	—
Total	471	100,0	740	100,0

Source: OPS, 1987.

Tableau 39.37 • Lits d'hôpitaux perdus à la suite du tremblement de terre de mars 1985 au Chili

Région	Nombre d'hôpitaux existants	Nombre de lits	Lits perdus dans la région	
			Nombre	%
Région métropolitaine (Santiago)	26	11 464	2 373	20,7
Région 5 (Viña del Mar, Valparaíso, San Antonio)	23	4 573	622	13,6
Région 6 (Rancagua)	15	1 413	212	15,0
Région 7 (Ralca, Meula)	15	2 286	64	2,8
Ensemble	79	19 736	3 271	16,6

Source: Wylie et Durkin, 1986.

industrielles et l'utilisation de technologies désuètes sont autant d'éléments qui ont contribué à accroître le risque d'accident technologique dans certaines régions.

L'absence de réglementation visant à maîtriser l'urbanisation à proximité des établissements industriels vient s'ajouter à la liste des facteurs de risque. Il est courant de voir, dans les grandes villes d'Amérique latine, des complexes industriels implantés au milieu de zones d'habitation dont les résidents ignorent tout des risques qu'ils encourent (Zeballos, 1993a).

S'agissant de l'implantation d'industries chimiques, on propose que les lignes directrices suivantes soient adoptées dans le but d'éviter des accidents semblables à ceux de Guadalajara (Mexique) en 1992 et de protéger les travailleurs industriels et l'ensemble de la population:

- choix de technologies adéquates et étude de solutions de rechange;
- choix d'un emplacement approprié;
- réglementation des zones d'habitation dans le voisinage des installations industrielles;
- examen des questions de sécurité relatives au transfert de technologie;
- inspection systématique des installations industrielles par les autorités locales;
- recours à des organismes techniques spécialisés;

Tableau 39.38 • Infrastructure hospitalière: facteurs de risque liés aux tremblements de terre

Éléments structurels	Éléments non structurels	Comportements
Conception	Matériel médical	Information de la population
Qualité de la construction	Matériel de laboratoire	Motivation
Matériaux	Matériel de bureau	Plans
Conditions du sol	Armoires, étagères	Programmes d'éducation
Caractéristiques sismiques	Cuisinières, réfrigérateurs, appareils de chauffage	Formation du personnel soignant
Date de l'événement	Appareils de radiographie	
Densité de la population	Matières réactives	

- définition du rôle des travailleurs en accord avec les règles de sécurité;
- élaboration d'une réglementation rigoureuse;
- classification des substances toxiques et supervision étroite de leur mise en œuvre;
- éducation de la population et formation des travailleurs;
- établissement de mécanismes d'intervention en cas d'urgence;
- formation des travailleurs de santé associés aux plans d'intervention en cas d'accident technologique.

Références bibliographiques

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), 1988: *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants INSAG-3*, Safety Standards Series No. 75 (Vienne).

—1989a: *L'accident radiologique de Goiânia* (Vienne).

—1989b: «A large-scale Co-60 contamination case: Mexico 1984», *Emergency Planning and Preparedness for Accidents Involving Radioactive Materials Used in Medicine, Industry, Research and Teaching* (Vienne).

—1990: *Recommendations for the Safe Use and Regulation of Radiation Sources in Industry, Medicine, Research and Teaching*, Safety Standards Series No. 102 (Vienne).

—1991: *The International Chernobyl Project. Technical Report. Assessment of Radiological Consequences and Evaluation of Protective Measures*. Report by an International Advisory Committee (Vienne).

—1994: *Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency*, Safety Standards Series No. 109 (Vienne).

—1996: *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, Safety Standards Series No. ST-1/Requirements (Vienne).

Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), 1987: *Les incidences radiologiques de l'accident de Tchernobyl dans les pays de l'OCDE* (Paris).

American Psychiatric Association (APA), 1996: *Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*, 4^e édition (Paris, Masson).

Andersson, N., Kerr Muir, M., Ajwani, M.K., Mahashabde, S., Salmon, A. et Vaidyanathan, K., 1986: «Persistent eye watering among Bhopal survivors», *The Lancet*, vol. 2, n° 8516, p. 1152.

Baker, E.L., Zack, M., Miles, J.W., Alderman, L., Warren, M., Dobbin, R.D., Miller, S. et Teeters, W.R., 1978: «Epidemic malathion poisoning in Pakistan malaria working», *ibid.*, vol. 1, n° 8054, pp. 31-34.

Baum, A., Cohen, L. et Hall, M., 1993: «Control and intrusive memories as possible determinants of chronic stress», *Psychosomatic Medicine*, vol. 55, n° 3, pp. 274-286.

Bertazzi, P.A., 1989: «Industrial disasters and epidemiology. A review of recent experiences», *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, vol. 15, n° 2, pp. 85-100.

—1991: «Long-term effects of chemical disasters. Lessons and result from Seveso», *Science of the Total Environment*, vol. 106, n° 1-2, pp. 5-20.

Bromet, E.J., Parkinson, D.K., Schulberg, H.C., Dunn, L.O. et Condek, P.C., 1982: «Mental health of residents near the Three Mile Island reactor: A comparative study of selected groups», *Journal of Preventive Psychiatry*, vol. 1, n° 3, pp. 225-276.

Bruk, G.Y., Kaduka, N.G. et Parkhomenko, V.I., 1989: *Air Contamination by Radionuclides as a Result of the Accident at the Chernobyl Power Station and its Contribution to Inner Irradiation of the Population* (en russe). Materials of the First All-Union Radiological Congress (21-27 août), Moscou. Abstracts, vol. II, pp. 414-416.

Bruzzi, P., 1983: «Health impact of the accidental release of TCDD at Seveso», dans F. Coulston et F. Pocchiarini (directeurs de publication): *Accidental Exposure to Dioxins. Human Health Aspects* (New York, Academic Press).

Bureau du Coordonnateur des Nations Unies pour les secours en cas de catastrophe (UNDRO), 1990: «Iran earthquake», *UNDRO News*, vol. 4, sept.

Bureau international du Travail (BIT), 1991: *Prévention des accidents industriels majeurs* (Genève).

—1993: *Maîtrise des risques d'accident majeur: guide pratique* (Genève).

Cardis, E., Gilbert, E.S. et Carpenter, L., 1995: «Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: Cancer mortality among nuclear industry workers in three countries», *Radiation Research*, vol. 142, n° 2, pp. 117-132.

Centers for Disease Control (CDC), 1989: *The Public Health Consequences of Disasters* (Atlanta).

Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID), 1989: *Seminario Internacional de Planamiento, Diseño, Reparación y Administración de Hospitales en Zonas Sísmicas: Conclusiones y Recomendaciones* (Lima, CISMID/Universidad Nacional de Ingeniería).

Chagnon, S.A., Jr., Schicht, R.J. et Semorin, R.J., 1983: *A Plan for Research on Floods and their Mitigation in the United States* (Champaign, Illinois, Illinois State Water Survey).

Chen, P.S., Luo, M.L., Wong, C.K. et Chen, C.J., 1984: «Polychlorinated biphenyls, dibenzofurans, and quaterphenyls in toxic rice-bran oil and PCBs in the blood of patients with PCB poisoning in Taiwan», *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 5, n° 1-2, pp. 133-145.

Coburn, A. et Spence, R., 1992: *Earthquake Protection* (Chichester, Wiley).

Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), 1988: *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation* (New York).

—1993: *Sources and Effects of Ionizing Radiation* (New York).

—1994: *ibid.* (New York).

Commission internationale de protection radiologique (CIPR), 1991: *Annals of the ICRP*, ICRP Publication No. 60 (Oxford, Pergamon Press).

Conseil des Communautés européennes (CEE), 1982: Directive du Conseil, du 24 juin 1982, concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles (82/501/CEE), *Journal officiel des Communautés européennes*, 5 août 1982, vol. 25, n° L230, pp. 1-18.

—1987: Directive du Conseil, du 19 mars 1987, modifiant la directive 82/501/CEE concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles (87/216/CEE), *ibid.*, 8 mars 1987, vol. 30, n° L85, pp. 36-39.

Das, J.J., 1985a: «Aftermath of Bhopal tragedy», *Journal of the Indian Medical Association*, vol. 83, n° 10, pp. 361-362.

—1985b: «The Bhopal tragedy», *ibid.*, n° 2, pp. 72-75.

Dew, M.A. et Bromet, E.J., 1993: «Predictors of temporal patterns of psychiatric distress during ten years following the nuclear accident at Three Mile Island», *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, vol. 28, n° 2, pp. 49-55.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1990: *Seismic considerations: Health care facilities*, Earthquake Hazard Reduction Series No. 35 (Washington, DC).

Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge (FISRCR), 1993:

The World Disaster Report (Dordrecht, Martinus Nijhoff).

Frazier, K., 1979: *The Violent Face of Nature: Severe Phenomena and Natural Disasters. Floods* (New York, William Morrow and Co.).

Friedrich Naumann Foundation, 1987: *Industrial Hazards in Transnational Work: Risk, Equity and Empowerment* (New York, Council on International and Public Affairs).

French, J. et Holt, K., 1989: *Floods: Public Health Consequences of Disasters*, Centers for Disease Control Monograph (Atlanta, CDC).

French, J., Ing, R., von Allman, S. et Wood, R., 1983: «Mortality from flash floods: A review of National Weather Service reports, 1969-81», *Public Health Reports*, vol. 98, n° 6, pp. 584-588.

Fuller, M., 1991: *Forest Fires* (New York, John Wiley).

Gilsanz, V., López Alvarez, J.L., Serrano, S. et Simón, J., 1984: «Evolution of the alimentary toxic oil syndrome due to ingestion of denatured rapeseed oil», *Archives of Internal Medicine*, vol. 144, n° 2, pp. 254-256.

Glass, R.I., Craven, R.B. et Bregman, D.J., 1980: «Injuries from the Wichita Falls tornado: Implications for prevention», *Science*, vol. 207, pp. 734-738.

Grant, C.C., 1993: «Triangle fire stirs outrage and reform», *NFPA Journal*, vol. 87, n° 3, pp. 72-82.

Grant, C.C. et Klem, T.J., 1994: «Toy factory fire in Thailand kills 188 workers», *ibid.*, vol. 88, n° 1, pp. 42-49.

Greene, W.A.J., 1954: «Psychological factors and reticuloendothelial disease: Preliminary observations on a group of males with lymphoma and leukemia», *Psychosomatic Medicine*, pp. 16-20.

Grisham, J.W., 1986: *Health Aspects of the Disposal of Waste Chemicals* (New York, Pergamon Press).

Herbert, P. et Taylor, G., 1979: «Everything you always wanted to know about hurricanes: Part 1», *Weatherwise*, avril.

High, D., Blodgett, J.T., Croce, E.J., Horne, E.O., McKeon, J.W. et Whelan, C.S., 1956: «Medical aspects of the Worcester tornado disaster», *New England Journal of Medicine*, vol. 254, pp. 267-271.

Holden, C., 1980: «Love Canal residents under stress», *Science*, vol. 208, n° 4449, pp. 1242-1244.

Homburger, E., Reggiani, G., Sambeth, J. et Wipf, H.K., 1979: «The Seveso accident: Its nature, extent and consequences», *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 22, n° 4, pp. 327-370.

Hunter, D., 1978: *The Diseases of Occupations* (Londres, Hodder and Stoughton).

Janerich, D.T., Stark, A.D., Greenwald, P., Burnett, W.S., Jacobson, H.I. et McCusker, J., 1981: «Increased leukemia, lymphoma and spontaneous abortion in Western New York following a disaster», *Public Health Reports*, vol. 96, juillet-août, n° 4, pp. 350-356.

Jeyaratnam, J., 1985: «1984 and occupational health in developing countries», *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, vol. 11, n° 3, pp. 229-234.

Jovel, J.R., 1991: *Los efectos económicos y sociales de los desastres naturales en América Latina y el Caribe* (Santiago). Document presented at the First Regional UNDP/UNDRO Disaster Management Training Program in Bogota, Colombia.

- Kilbourne, E.M., Rigau-Pérez, J.G., Heath C.W. Jr., Zack, M.M., Falk, H., Martin-Marcos, M. et de Carlos, A., 1983: «Clinical epidemiology of toxic-oil syndrome. Manifestations of a new illness», *New England Journal of Medicine*, vol. 309, n° 23, pp. 1408-1414.
- Klem, T.J., 1992: «25 die in food plant fire», *NFPA Journal*, vol. 86, n° 1, pp. 29-35.
- Klem, T.J. et Grant, C.C., 1993: «Three workers die in electrical power plant fire», *ibid.*, vol. 87, n° 2, pp. 44-47.
- Krasnyuk, E.P., Chernyuk, V.I. et Stezhka, V.A., 1993: *Work conditions and health status of operators of agricultural machines in areas being under control due to the Chernobyl accident* (en russe). Abstracts. Chernobyl and Human Health Conference (20-22 avril).
- Krishna Murti, C.R., 1987: «Prevention and control of chemical accidents: Problems of developing countries», dans *Istituto Superiore di Sanità, Organisation mondiale de la santé (OMS), Programme international sur la sécurité des substances chimiques (PISSC)* (Edimbourg, CEP Consultants).
- Lechat, M.F., 1990: «The epidemiology of health effects of disasters», *Epidemiologic Reviews*, vol. 12, pp. 192-198.
- Logue, J.N., 1972: *Long Term Effects of a Major Natural Disaster: The Hurricane Agnes Flood in the Wyoming Valley of Pennsylvania, June 1972*, thèse de doctorat, Columbia University School of Public Health.
- Logue, J.N. et Hansen, H., 1980: «A case control study of hypertensive women in a post-disaster community: Wyoming Valley, Pennsylvania», *Journal of Human Stress*, vol. 6, n° 2, pp. 28-34.
- Logue, J.N., Melick, M.E. et Hansen, H., 1981: «Research issues and directions in the epidemiology of health effects of disasters», *Epidemiologic Reviews*, vol. 3, pp. 140-162.
- Loshchilov, N.A., Kashparov, V.A., Yudin, Y.B., Proshchak, V.P. et Yushchenko, V.I., 1993: «Inhalation intake of radionuclides during agricultural works in the areas contaminated by radionuclides due to the Chernobyl accident» (en russe), *Gigiena i sanitaria*, vol. 7, pp. 115-117.
- Mandlebaum, I., Nahrwold, D. et Boyer, D.W., 1966: «Management of tornado casualties», *Journal of Trauma*, vol. 6, n° 3, pp. 353-361.
- Marrero, J., 1979: «Danger: Flash floods — The number one killer of the 70's», *Weatherwise*, fév., pp. 34-37.
- Masuda, Y. et Yoshimura, H., 1984: «Polychlorinated biphenyls and dibenzofurans in patients with yusho and their toxicological significance: A review», *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 5, n° 1-2, pp. 31-44.
- Melick, M.F., 1976: *Social, Psychological and Medical Aspects of Stress-related Illness in the Recovery Period of a Natural Disaster*, mémoire, Albany, State University of New York.
- Mogil, M., Monro, J. et Groper, H., 1978: «NWS's flash flood warning and disaster preparedness programs», *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 59, pp. 59-66.
- Morrison, A.S., 1985: *Screening in Chronic Disease* (Oxford, Oxford University Press).
- National Fire Protection Association (NFPA), 1993: *National Fire Alarm Code*, NFPA No. 72 (Quincy, Massachusetts).
- , 1994a: *Standard for the Installation of Sprinkler Systems*, NFPA No. 13 (Quincy, Massachusetts).
- , 1994b: *Life Safety Code*, NFPA No. 101 (Quincy, Massachusetts).
- , 1995: *Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems*, NFPA No. 25 (Quincy, Massachusetts).
- Nénot, J.C., 1993: *Les surexpositions accidentelles*, Commissariat à l'énergie atomique (CEA), rapport du Département de protection de la santé de l'homme et de dosimétrie (DPHD) DPHD/93-04.a, pp. 3-11.
- Organisation mondiale de la santé (OMS), 1984: *Toxic Oil Syndrome. Mass Food Poisoning in Spain. Report of a WHO Meeting, Madrid, 21-25 March 1983* (Copenhague, Bureau régional de l'Europe de l'OMS).
- Organisation panaméricaine de la santé (OPS), 1987: *Crónicas de Desastre: Terremoto en México* (Washington, DC).
- , 1989: *Analysis of PAHO's Emergency Preparedness and Disaster Relief Program*, Executive Committee document SPP12/7 (Washington, DC).
- Otake, M. et Schull, W.J., 1992: *Radiation-related Small Head Sizes among Prenatally Exposed Atomic Bomb Survivors*, Technical Report Series No. 6-92.
- Otake, M., Schull, W.J. et Yoshimura, H., 1989: *A Review of Radiation-related Damage in the Prenatally Exposed Atomic Bomb Survivors*, Commentary Review Series No. 4-89.
- Parrish, R.G., Falk, H. et Melius, J.M., 1987: «Industrial disasters: Classification, investigation, and prevention», dans J.M. Harrington (directeur de publication): *Recent Advances in Occupational Health* (Edimbourg, Churchill Livingstone).
- Peisert, M., Cross, R.E. et Riggs, L.M., 1984: *The Hospital's Role in Emergency Medical Services Systems* (Chicago, American Hospital Publishing).
- Pesatori, A.C., 1995: «Dioxin contamination in Seveso: The social tragedy and the scientific challenge», *Medicina del Lavoro*, vol. 86, n° 2, pp. 111-124.
- Peter, R.U., Braun-Falco, O. et Birioukov, A. et coll., 1994: «Chronic cutaneous damage after accidental exposure to ionizing radiation: The Chernobyl experience», *Journal of the American Academy of Dermatology*, vol. 30, n° 5, pp. 719-723.
- Pocchiari, F., di Domenico, A., Silano, V. et Zapponi, G., 1983: «Environmental impact of the accidental release of tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin (TCDD) at Seveso», dans *Accidental Exposure to Dioxins: Human Health Aspects*, op. cit.
- , 1986: «The Seveso accident and its aftermath», dans P.R. Kleindorfer et H.C. Kunreuther (directeurs de publication): *Insuring and Managing Hazardous Risks: From Seveso to Bhopal and Beyond* (Berlin, Springer-Verlag).
- Rodrigues de Oliveira, A., 1987: «Un répertoire des accidents radiologiques, 1945-1985», *Radioprotection*, vol. 22, n° 2, pp. 89-135.
- Sainani, G.S., Joshi, V.R., Mehta, P.J. et Abraham, P., 1985: «Bhopal tragedy — A year later», *Journal of the Association of Physicians of India*, vol. 33, n° 12, pp. 755-756.
- Salzman, J.J., 1987: *«Schweizerhallo» and its Consequences* (Edimbourg, CEP Consultants).
- Shore, R.E., 1992: «Issues and epidemiological evidences regarding radiation-induced thyroid cancer», *Radiation Research*, vol. 131, n°1, pp. 98-111.
- Spurzem, J.R. et Lockey, J.E., 1984: «Toxic oil syndrome», *Archives of Internal Medicine*, vol. 144, n° 2, pp. 249-250.
- Stsjazhko, V.A., Tsyb, A.F., Tronko, N.D., Souchkevitch, G. et Baverstock, K.F., 1995: «Childhood thyroid cancer since accidents at Chernobyl», *British Medical Journal*, vol. 310, n° 6892, p. 801.
- Tachakra, S.S., 1987: *The Bhopal Disaster* (Edimbourg, CEP Consultants).
- The Lancet*, 1983: «Toxic oil syndrome», vol. 1, n° 8336, pp. 1257-1258.
- , 1990: «Disaster epidemiology», vol. 336, n° 8719, pp. 845-846.
- Thierry, D., Goumelon, P., Parmentier, C. et Nénot, J.C., 1995: «Hematopoietic growth factors in the treatment of therapeutic and accidental irradiation-induced aplasia», *International Journal of Radiation Biology*, vol. 67, n° 2, pp. 103-117.
- Time-Life*: «Understanding science and nature: Weather and climate», 1992 (Alexandria, Virginie).
- Ursano, R.J., McCaughey, B.G. et Fullerton, C.S., 1994: *Individual and Community Responses to Trauma and Disaster: The Structure of Human Chaos* (Cambridge, Cambridge University Press).
- US Agency for International Development (USAID), 1989: *Soviet Union: Earthquake, OFDA/AID Annual Report, FY1989* (Arlington, Virginie).
- Walker, P., 1995: *World Disaster Report* (Genève, FICRCR).
- Wall Street Journal*, 1993: «Thailand fire shows region cuts corners on safety to boost profits», 13 mai.
- Weiss, B. et Clarkson, T.W., 1986: «Toxic chemical disasters and the implication of Bhopal for technology transfer», *The Milbank Quarterly*, vol. 64, n° 2, pp. 216-240.
- Whitlow, J., 1979: *Disasters: The Anatomy of Environmental Hazards* (Athens, Géorgie, University of Georgia Press).
- Williams, D., Pinchera, A., Karaoglou, A. et Chadwick, K.H., 1993: *Thyroid Cancer in Children Living Near Chernobyl. Expert Panel Report on the Consequences of the Chernobyl accident* (Bruxelles, Commission des Communautés européennes (CCE)).
- Wyllie, L. et Durkin, M., 1986: «The Chile earthquake of March 3, 1985: Casualties and effects on the health care system», *Earthquake Spectra*, vol. 2, n° 2, pp. 489-495.
- Zeballos, J.L., 1993a: *Los Desastres Químicos. Capacidad de Respuesta de los Países en Via de Desarrollo* (Washington, DC, OPS).
- , 1993b: «Effects of natural disasters on the health infrastructure: Lessons from a medical perspective», *Bulletin of the Pan American Health Organization*, vol. 27, n° 4, pp. 389-396.
- Zerbib, J.C., 1993: «Les accidents radiologiques survenus lors d'usages industriels de sources radioactives ou de générateurs électriques de rayonnement», *Sécurité des sources radioactives scellées et des générateurs électriques de rayonnement* (Paris, Société française de radioprotection (SFRP)).

Références complémentaires

- Akleyev, A.V. et Lyubchansky, E.R., 1994: «Environmental and medical effects of nuclear weapon production in the Southern Urals», *Science of the Total Environment*, vol. 142, n° 1-2, pp. 1-8.
- Baxter, P.J., Davies, P.C. et Murray, V., 1989: «Medical planning for toxic releases into the community: The example of chlorine gas», *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 46, n° 4, pp. 277-285.
- Bertazzi, P.A., 1995: «Man-made chemical disasters», dans R. Bertolini, Lebowitz, M.D., Saracci, R. et Savitz, D.A. (directeurs de publication): *Environmental Epidemiology: Exposures and Disease* (Boca Raton, Floride, Lewis).
- Bertazzi, P.A. et di Domenico, A., 1994: «Chemical, environment, and health aspects of the Seveso, Italy, accident», dans A. Schecter (directeur de publication): *Dioxins and Health* (New York, Plenum).
- Bertazzi, P.A., Pesatori, A.C., Consonni, D., Tironi, A., Landi, M.T. et Zocchetti, C., 1993: «Cancer incidence in a population accidentally exposed to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin», *Epidemiology*, vol. 4, n° 5, pp. 398-406.
- Bertazzi, P.A., Zocchetti, C., Pesatori, A.C., Guercilena, S., Sanarico, M. et Radice, L., 1989: «Ten-year mortality study of population involved in the Seveso incident in 1976», *American Journal of Epidemiology*, vol. 129, n° 6, pp. 1187-1200.
- Bureau du Coordonnateur des Nations Unies pour les secours en cas de catastrophe (UNDRO), 1991: *Mitigating Natural Disasters* (New York).
- Castle, M., 1993: *The Transport of Dangerous Goods: A Short Guide to the International Regulations* (Leatherhead, PIRA International).

- Doll, R., 1985: «Purpose of symposium», dans N.J. Wald et R. Doll (directeurs de publication): *Interpretation of Negative Epidemiological Evidence for Carcinogenicity* (Lyon, CIRC).
- Federal Department of Civil Aviation, 1988: *Weisungen für Lawinensprengensätze mit Helikoptern* (Berne).
- Federal Ministry for Public Economy and Transport, 1990: *Sicherheitstechnische Richtlinien für das künstliche Auslösen von Lawinen durch Sprengungen von Hubschraubern aus*. Decree of the Federal Ministry for Public Economy and Transport, Austria, Zl. 431,000/31/90, dated 27 June 1990.
- , 1993: *Richtlinien für das künstliche Auslösen von Lawinen durch Arbeitnehmer bei Seilbahnunternehmen*. Decree of the Federal Ministry for Public Economy and Transport, Austria, Zl. 443,017/1-IV/52/93, dated January 93.
- Gubler, H., 1988a: «Temporäre und permanente Lawinenschutzmassnahmen für touristische Anlagen», *Internationale Seilbahnrundschau*, vol. 1, pp. 22-24.
- , 1988b: «Temporäre und permanente Lawinenschutzmassnahmen für touristische Anlagen», *ibid.*, vol. 2, pp. 18-20.
- Health and Safety Commission, 1991: *Major Hazard Aspects of the Transport of Dangerous Substances* (Londres, HMSO).
- Huguenard, P. (directeur de publication), 1996: *Catastrophes — De la stratégie d'intervention à la prise en charge médicale* (Paris, Editions scientifiques et médicales Elsevier).
- Kert, C., 1999: *Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France*, rapport Sénat n° 312 (1998-1999), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Paris).
- Lechat, M.F., 1991: «The international decade for natural disaster reduction: Background and objectives», *Disasters*, vol. 14, pp. 1-6.
- Meulenbelt, J., Noordergraaf, G.J. et Savelkoud, T.J.F., 1994: *Health Aspects Chemical Accident* (La Haye, Koninklijke Bibliotheek).
- Murray, V., 1990: *Major Chemical Disasters. Medical Aspects of Management* (Londres, Royal Society of Medicine Services).
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), 1991a: *Répertoire international des centres d'intervention* (Paris).
- , 1991b: *Guide de l'utilisateur des systèmes d'information existant dans les pays membres de l'OCDE à l'usage des responsables des plans d'urgence et de l'intervention* (Paris).
- , 1992: *Accidents chimiques. Principes directeurs pour la prévention, la préparation et l'intervention* (Paris).
- , 1994: *Aspects des accidents chimiques touchant à la santé* (Paris).
- Organisation mondiale de la santé (OMS) et European Centre for Environment and Health (ECEH) Working Group, 1995: *Assessment of Health Consequences of Major Chemical Incidents. Epidemiological Approach* (Bilthoven, ECEH).
- Technica*, 1991: «Lessons learned from emergencies after accidents in the United Kingdom involving dangerous chemical substance» (Londres).