

# “Trop” de sûreté est-ce encore la sûreté?

---

par S.C. Black et F. Niehaus

Toute activité humaine comporte des risques pour la vie ou la santé. Bien qu'il soit possible de réduire le risque existant dans une activité donnée, il n'est pas possible d'atteindre le "risque zéro" ou la "sûreté absolue" qu'on exige souvent. Une fois reconnu ce principe général, il devient alors nécessaire de définir un niveau admissible de risque.

On utilise couramment trois méthodes pour déterminer ce niveau admissible: par la première méthode qui consiste à *situer les risques en perspective*, on peut juger si les risques inhérents à une technologie sont réduits par rapport aux risques existant en raison de technologies acceptées [1, 2]. On a proposé d'admettre que le risque lié à une technologie nouvelle devrait être au moins dix fois inférieur à celui de technologies bien établies [3, 4]. Dans la seconde méthode, une *comparaison des risques et des avantages* d'une série d'options possibles peut être utilisée afin de choisir parmi celles-ci. Une telle procédure nécessite l'expression du risque et des avantages dans une unité commune, généralement en termes monétaires. Toutefois, ces deux méthodes ne répondent pas à la question de savoir si une technologie donnée doit ou non être rendue plus sûre. En conséquence, dans une troisième méthode, les décisions relatives à la sûreté sont fondées sur une approche plus complexe d'*analyse coût-efficacité* ou analyse coût marginal-utilité.

## L'ANALYSE COUT-EFFICACITE

Les dépenses de sûreté suivent généralement la loi des rendements décroissants. La relation générale qui exprime cette loi est illustrée par la figure 1 [5], et des études de cas sont présentées dans [6, 7]. La figure montre qu'il est possible de réduire un risque relativement élevé à un niveau plus bas (p.ex.  $\Delta R_1$ ) pour un coût supplémentaire relativement faible (p.ex.  $\Delta C_1$ ). Il devient cependant de plus en plus coûteux de réduire davantage le risque (p.ex. de  $S_5$  à  $S_6$ ). La relation  $\Delta R/\Delta C$  (c'est-à-dire la dérivée première) en chaque point de la courbe donne la mesure du rapport coût-efficacité d'une réduction plus poussée du risque par rapport au niveau de sûreté représenté par ce point. Ces coûts marginaux de la réduction du risque peuvent se mesurer en termes d'effets sur la santé humaine évités par unité de coût de réduction du risque (par exemple, journées de travail qu'on évite de perdre par million de dollars\*). De cette figure se dégagent deux conclusions:

- 1) le coût marginal de la réduction du risque croît avec le niveau de sûreté atteint; et
- 2) pour un niveau de sûreté donné, il est possible de pousser plus loin la réduction du risque existant; il n'est cependant pas possible de réduire le risque au niveau zéro.

Ces conclusions à leur tour amènent à poser deux questions. Premièrement, est-il nécessaire que les technologies soient rendues *aussi sûres que le permettent les possibilités techniques*? Bien que ceci soit une approche séduisante à première vue, notre expérience quotidienne démontre que ce n'est pas réalisable. Dans le cas de l'automobile, par exemple, il s'offre d'innombrables possibilités d'améliorer la sûreté. Mais il est évident qu'on ne peut pas protéger toutes les rues par des ensembles de barrières de sécurité, ou les équiper toutes

---

M. Black est administrateur hors-classe et M. Niehaus est Chef de projet pour le projet mixte AIEA/IIASA sur l'évaluation des risques.

\* Tous les coûts monétaires cités dans cet article sont exprimés en dollars des Etats-Unis.

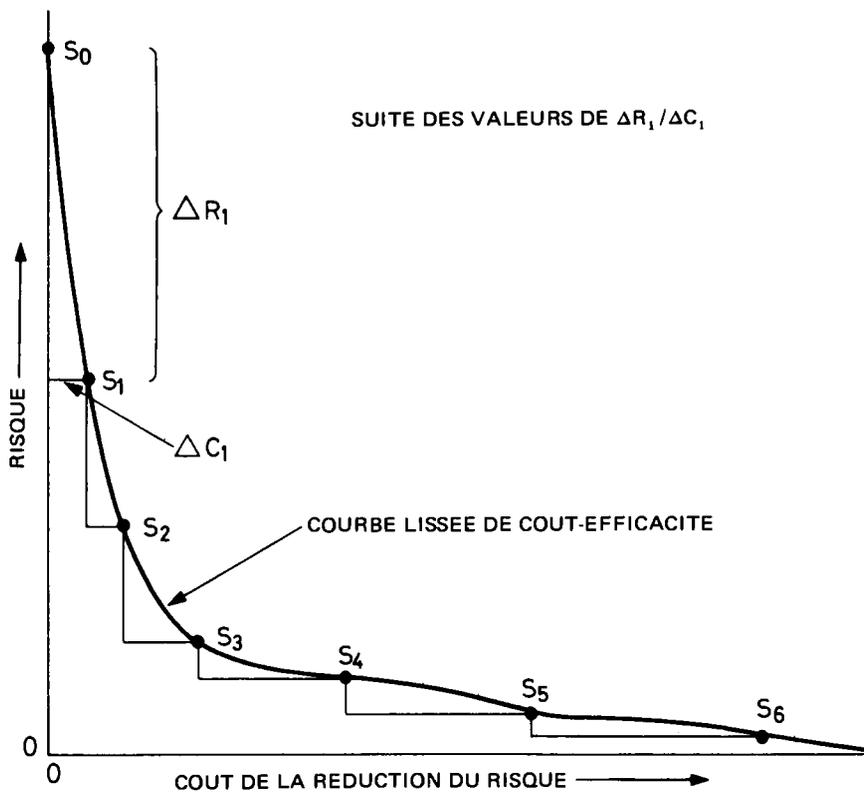


FIGURE 1. Coût-efficacité de la réduction du risque [5].

d'éclairage public; qu'on ne peut remplacer tous les croisements par des passages souterrains, etc. Les décisions relatives à la sûreté doivent donc être prises de façon à dépenser les ressources collectives, qui ne sont pas illimitées, avec un bon rapport coût-efficacité. Les deux conclusions tirées de la figure 1 impliquent que ce qui est "sûr" résulte toujours d'un compromis entre deux objectifs: utiliser des ressources limitées de la façon la plus efficace (minimisation du coût) et atteindre le niveau de sûreté le plus élevé possible (minimisation du risque).

Deuxièmement, peut-on assigner une valeur monétaire à la vie humaine? Tout point de la courbe de la figure 1 qui pourrait être choisi comme limite au-delà de laquelle on n'envisage pas de réduire le risque se caractérise par des dépenses spécifiques par unité de réduction du risque. En particulier, tout risque de mortalité supprimé implique une valeur monétaire par vie humaine sauvée. S'agissant de décisions relatives à la sûreté, ce taux a souvent été mal interprété et a été la cause d'une grande confusion. De nombreuses tentatives ont été faites pour calculer une "valeur de la vie humaine" [8] (notions de capital humain, de prix accepté). L'opinion personnelle des auteurs du présent article est que ces approches ne sont pas pertinentes en matière de décisions relatives à la sûreté, et sont même préjudiciables à l'acceptation par le public des normes de sûreté. Le motif qui conduit à choisir une valeur type

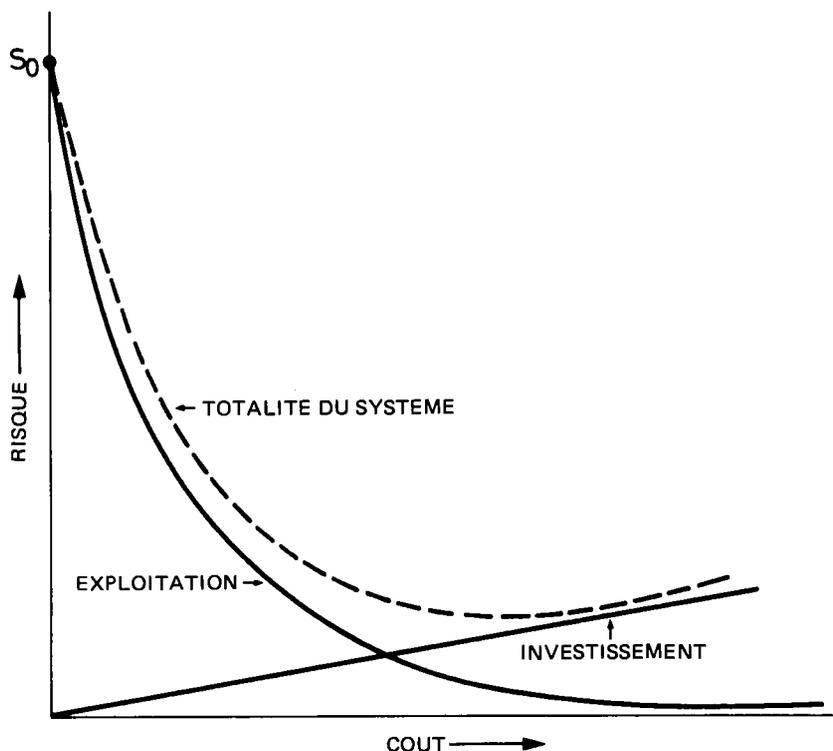
pour ce taux ne devrait pas être la volonté de déterminer la "valeur de la vie humaine". Un tel taux n'a de validité qu'aux fins de *comparer les dépenses de sûreté* pour divers types de risques auxquels l'homme est exposé. A l'heure actuelle, ces dépenses semblent se situer aux alentours de 300 000 dollars par vie sauvée. Cette valeur moyenne ne fait que refléter le large éventail de coûts observés en pratique; elle ne se déduit pas d'une règle ou d'une méthodologie générale. Des dépenses largement supérieures à cette valeur du coût marginal de réduction du risque indiqueraient qu'il serait plus efficace en termes de coût d'affecter les ressources limitées de la collectivité à d'autres domaines où elles produiraient une plus grande réduction du risque. Ces considérations valent particulièrement pour les services publics essentiels, comme la production d'électricité, où les dépenses qui vont au-delà de ce qu'exige le principe du risque "le plus bas qu'on puisse raisonnablement atteindre" sont directement répercutées sur le prix du kWh et sont donc supportées par chaque membre de la société. Il a été proposé [9] que soit fixée une valeur uniforme pour tous les secteurs économiques et que les écarts constatés se traduisent par une augmentation ou diminution des impositions.

Cette approche se fonde sur l'affectation optimale des ressources limitées de la collectivité aux dépenses de sûreté. Elle ne répond pas, toutefois, au problème plus général des dépenses globales de sûreté puisque, comme l'indique la figure 1, tout risque existant peut être réduit au-delà de toute limite donnée à un coût très élevé. Toutefois, nous allons maintenant essayer de montrer qu'il existe en pratique une limite à la réduction du risque, parce que des dépenses excessives en matière de réduction des risques produiront en fait un accroissement du risque total pour la collectivité.

Examinons la question d'une réduction plus poussée des risques liés à l'exploitation des centrales nucléaires. Pour les mesures de sûreté se situant à un niveau extrêmement élevé de coût marginal de réduction du risque, il devient important de tenir compte des risques pour les travailleurs et la population dus à la production même de matériel de sûreté, qui ont été négligés dans la figure 1. La courbe devrait donc être légèrement modifiée. Comme l'indique la figure 2, une fonction linéaire devrait être ajoutée pour intégrer le risque lié à la production de matériel de sûreté. Ceci ne modifie pas la courbe de la figure 1 si les coûts marginaux restent relativement bas. En revanche, pour des valeurs beaucoup plus élevées, cette fonction linéaire, lorsqu'elle s'ajoute à l'autre courbe, produit une courbe résultante pour le risque total qui passe par un minimum. Pour des coûts élevés, la courbe de risque total ne se rapproche plus du niveau zéro, mais du niveau de risque lié à la production de matériel de sûreté. Le minimum se situe au point où les coûts marginaux de réduction du risque (c'est-à-dire la dérivée première de la courbe "exploitation") sont égaux au risque spécifique lié à la production de matériel de sûreté (c'est-à-dire la pente de l'élément linéaire).

## LE RISQUE LIÉ À LA PRODUCTION DE MATÉRIEL DE SÛRETÉ

Calculer ce risque revient à déterminer la pente de la droite de la figure 2, qui représente les *effets sur la santé par unité de coût du matériel de sûreté*. Pour les calculs, nous avons considéré que dans le matériel de sûreté installé, il entre pour 30% de travaux de construction, 10% de services et 60% de machines-outils et de matériel électrique. La construction de machines-outils, par exemple, nécessite l'exploitation de mines de charbon et de minerai, le raffinage du minerai, la production de coke, la fabrication d'acier, des opérations de fonderie, de transport, l'utilisation d'électricité, etc.; elle met donc en jeu toute une chaîne d'activités; cette matrice d'activités est appelée tableau des échanges intersectoriels et s'utilise en économie pour décrire en termes monétaires les interactions entre secteurs économiques. En se fondant sur ces tableaux ainsi que sur les données relatives aux blessures et décès dus à des accidents du travail, on peut construire une matrice qui décrit les flux d'effets sur la santé et non plus les flux monétaires. Une opération mathématique simple



**FIGURE 2.** Relation principale exprimant le rapport coût-efficacité de la réduction du risque lorsqu'on envisage la totalité du système économique.

(la matrice de Leontief inversée) permet de faire la somme des risques liés à toutes les étapes intermédiaires. Les effets liés au travail utilisés ici dérivent des données de 1973 relatives à la République fédérale d'Allemagne. Le tableau 1 donne des résultats représentatifs de diverses branches. On peut voir que les industries extractives entraînent le plus d'effets sur la santé par valeur unitaire de biens produits, bien qu'elles nécessitent moins d'heures de travail que la construction. Les accidents mortels de la circulation liés au travail sont les plus nombreux dans la construction.

Sur la base de la composition ci-dessus indiquée pour le matériel de sûreté, le tableau 2 donne le risque professionnel total et les heures de travail nécessaires. Il faut noter la part relativement élevée des accidents de la circulation liés au travail dans les effets globaux sur la santé. Les chiffres du tableau 2 tiennent compte des décès et des journées de travail perdues pour cause de maladie; on a combiné ces données en admettant qu'un décès équivaut à 6000 journées de travail perdues.

**Tableau 1. Nombre total d'heures de travail et effets sur la santé des travailleurs pour la production de biens et de services d'une valeur de 1 million de dollars**

Branche	Nombre total d'heures de travail	Accidents du travail: décès (10 <sup>-2</sup> )	Accidents de circulation liés au travail: décès (10 <sup>-2</sup> )	Maladies professionnelles: décès (10 <sup>-3</sup> )	Heures de travail perdues
Machines-outils et matériel électrique	82 000	0,470	0,354	0,302	416
Industries extractives	76 600	1,916	0,340	8,740	1040
Carrières	63 200	1,182	0,356	0,894	438
Textile et habillement	119 600	0,270	0,314	0,232	336
Services, alimentation et produits de luxe	75 000	0,566	0,210	0,206	118
Construction	101 000	1,492	0,592	0,344	630

**Tableau 2. Risque professionnel total lié à la production de matériel de sûreté d'une valeur de 1 million de dollars**

Nombre total d'heures de travail	87 000
Heures de travail perdues	450
Accidents du travail/décès	$7,86 \times 10^{-3}$
Accidents de circulation/décès	$4,12 \times 10^{-3}$
Maladies professionnelles/décès	$0,306 \times 10^{-3}$
Nombre total de décès	$12,28 \times 10^{-3}$
$\Sigma$ équivalent décès*	$21,6 \times 10^{-3}$
ou	
$\Sigma$ équivalent journées de travail perdues*	130

\* 1 décès = 6000 journées de travail perdues.

Alors que les données sont assez sûres dans le domaine des accidents du travail, elles sont inexistantes en ce qui concerne les risques pour la population. Afin d'estimer leur ordre de grandeur, les hypothèses suivantes ont été faites pour les risques provenant:

- de l'énergie: on considère qu'une quantité d'énergie primaire d'environ 700 tonnes d'équivalent charbon (tec) est nécessaire pour produire 1 million de dollars de matériel [10]. Si cette énergie est produite par du charbon, et qu'on évalue les décès à 10 par GW(e)/an, le risque total serait de  $2,6 \times 10^{-3}$  décès par million de dollars de matériel;
- de l'industrie: les données de 1970 pour la République fédérale d'Allemagne [11] indiquent que les risques provoqués par les rejets industriels sont à peu près équivalents à ceux de la production d'énergie;
- des accidents de circulation: on considère que dans ce domaine le risque professionnel est à peu près égal au risque pour la population.

Au total, il semble donc que le risque pour la population ajoute environ 50% au risque professionnel. Ainsi, le risque spécifique de la production de matériel de sûreté ( $r_p$ ) est estimé à environ  $3 \times 10^{-2}$  équivalent-décès ou l'équivalent de 180 journées de travail perdues par million de dollars de matériel. On trouvera en [12] une description plus détaillée des calculs conduisant à cette valeur de  $r_p$ .

## APPLICATIONS

Le risque spécifique  $r_p$  détermine la pente de la droite de la figure 2. On peut aussi l'exprimer en disant qu'une dépense de 33 millions de dollars pour le matériel de sûreté entraînerait 1 équivalent-décès au cours de la construction et de l'installation.

Cette valeur peut à son tour être utilisée pour déterminer le risque minimum d'après la courbe représentant la totalité du système. Ce minimum est atteint lorsque le coût marginal de réduction du risque (la courbe "Exploitation") a la même pente (mais de signe opposé) que la droite "Investissement". En ce point, la production et l'installation de matériel de sûreté entraîneraient 1 équivalent d'effet sur la santé parmi les travailleurs et la population quand on cherche à éviter à un moment futur la valeur estimée de 1 équivalent d'effet parmi la population. En d'autres termes, une mort statistiquement certaine est provoquée au moment présent au lieu d'une mort hypothétique par la suite. Il est évident que si les coûts des mesures de sûreté dépassent ce minimum, ils entraîneront plus d'effets sur la santé qu'ils n'en éviteront. Ainsi, ce niveau de 33 millions de dollars environ par équivalent de vie sauvée semble représenter la limite absolue, en termes physiques, de la réduction du risque. (Il faut remarquer qu'un tel principe est utilisé également dans la pratique médicale: les recommandations en faveur de la vaccination antivariolique ont été rapportées car il était devenu plus fréquent de contracter la maladie par vaccination que par contagion.)

Il est certain que ces risques pour les travailleurs et la population apparaîtraient également s'il s'agissait de produire d'autres biens que du matériel de sûreté. Toutefois, cet argument ne doit pas conduire à envisager seulement les effets nets, car la production d'autres biens entraînerait un avantage pour la société, et il conviendrait de comparer les risques inhérents aux divers modes de production de ces biens.

Il est intéressant de comparer maintenant ce résultat avec les dépenses de sûreté effectives dans diverses branches. Le lecteur se reportera à [9] qui offre un ensemble de données. Quelques exemples représentatifs extraits de [6] sont donnés dans le tableau 3. On voit que  $r_p$  est dépassé dans plusieurs cas. La deuxième colonne donne le rapport entre effets évités et effets provoqués. Un rapport de 1 indiquerait qu'aucun gain net n'est réalisé et un chiffre supérieur à 1 que le risque a en fait été accru. Toutefois, nous n'entendons pas suggérer que le coût marginal de réduction du risque devrait être effectivement porté à ce niveau de 33 millions de dollars par équivalent de vie sauvée, pour les raisons développées ci-dessous.

A partir du tableau 2, on calcule que moyennant un volume d'emploi d'environ 1400 hommes-années, on déplacerait simplement 1 équivalent-décès (soit l'équivalent de 6000 journées perdues) de la période d'exploitation (ou plus tard) à la période de construction, sans réaliser de gain net. Ceci requiert un développement. Prenons l'exemple des recombinateurs et des six lits de charbon du tableau 3.

Le rapport coût-efficacité de la réduction du risque pour l'adjonction de six lits de charbon a été estimé à 22 millions de dollars par équivalent de vie sauvée (sur la base de 2 morts par 10 000 hommes/remes). Le coût total d'investissement de ce système se situe aux environs de 3 millions de dollars par centrale. Supposons que ce système soit appliqué dans 10 réacteurs; l'investissement total serait donc de 30 millions de dollars. D'après les données de coût-efficacité, on déduit que cet investissement sauverait environ 1,36 équivalent de vie. Le présent article suggère, sur la base des données relatives à la République fédérale d'Allemagne, qui ne sont peut-être pas directement applicables à cette situation spécifique, que la production de ces 10 systèmes provoquerait environ 0,91 équivalent-décès parmi les travailleurs et la population. De la sorte, le risque ne serait en fait réduit que d'environ 3000 journées de travail perdues. Pour réduire le risque d'une demi-vie, la collectivité devrait investir en main-d'œuvre des ressources représentant 1300 hommes-années, sans compter l'énergie et les matières premières nécessaires. Au total, la collectivité devrait

**Tableau 3. Comparaison des coûts marginaux de réduction du risque [6] avec  $r_p$  (1 équivalent décès/33 millions de dollars)**

Mesure de sûreté	Millions de dollars par vie sauvée	( Millions de dollars par vie sauvée ) $\cdot r_p^*$
Ceintures de sécurité dans les automobiles	0,3	0,01
Prévention des incendies dans les tours d'habitation	40	1,21
Désulfuration à 50% des rejets gazeux d'une centrale thermique avec:		
cheminée de 30 mètres	0,2	0,006
cheminée de 120 mètres	2,5	0,08
Centrales nucléaires avec <sup>**</sup> :		
recombineurs	9	0,27
adjonction de 6 lits de charbon	22	0,66
adjonction de 12 lits de charbon <sup>+</sup>	150	4,5
traitement de l'iode <sup>+</sup>	500	15,0

\* Une valeur supérieure à 1 indique que le risque lié à la mise en place de dispositifs de sûreté est plus grand que la réduction de risque recherchée.

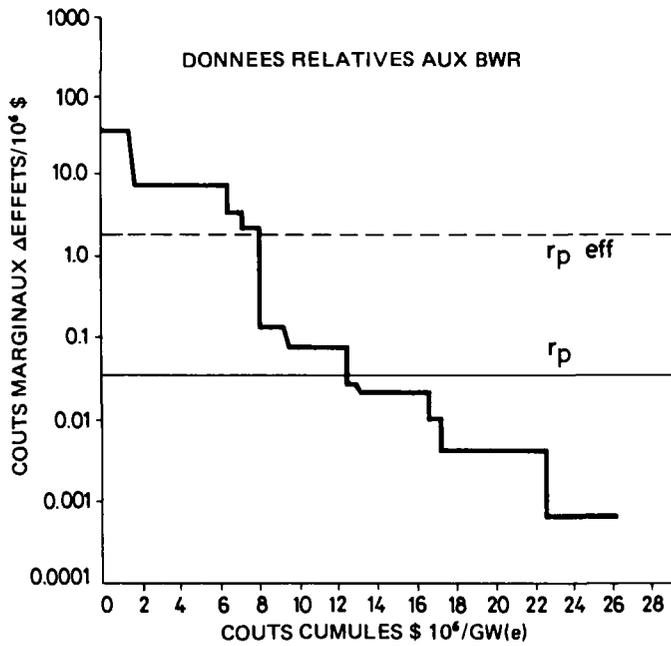
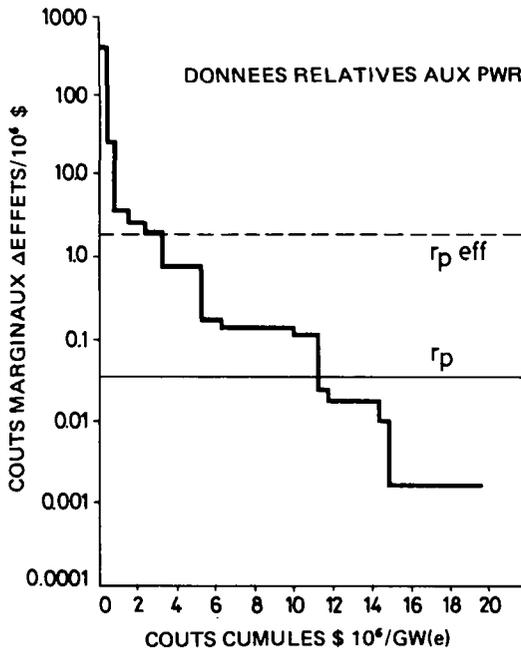
\*\* Sur la base de 2 effets par  $10^6$  hommes-rem (cancer mortel plus effets génétiques graves pour toutes les générations).

+ Mesure proposée, non appliquée.

supporter le coût d'un volume d'emploi de 1300 hommes-années et de 0,9 décès pour éviter 1,4 effet grave sur la santé.

Reste donc à savoir combien de journées de main-d'œuvre devraient être utilisées pour éviter un effet sur la santé équivalent à une journée de travail perdue. Ce problème exigeant une étude approfondie, nous ne pouvons ici offrir une solution. Nous dirons en première approximation que la collectivité devrait dépenser des ressources en main-d'œuvre égales à un homme-année pour un gain d'une année de vie. Dans ce cas, en ajoutant la perte de l'équivalent d'une vie à 59 vies de travail (1400 hommes-années)/33 millions de dollars, on obtient un investissement total de 60 vies, soit un  $r_p$  effectif égal à l'équivalent d'une vie par demi-million de dollars. Dans cette valeur prédominant clairement les besoins en main-d'œuvre. En termes de radioprotection, notons que cette valeur correspondrait à 100 dollars par homme-rem.

Pour revenir à la question de la sûreté dans les centrales nucléaires, considérons l'étude récente de l'EPA [7], qui présente des calculs de coût-efficacité relatifs aux systèmes de



**FIGURE 3. Coût-efficacité de la réduction du risque [7].**

réduction des risques dans les cycles complets du combustible pour les réacteurs à eau sous pression (PWR) et à eau bouillante (BWR). Dans la figure 3, les inverses des coûts marginaux de réduction du risque sont portés sur une échelle logarithmique. Si on applique un risque spécifique  $r_p$  de un décès/33 millions de dollars, on voit qu'en fait plusieurs systèmes de réduction du risque envisagés éviteraient moins d'effets prévus sur la santé que n'en entraînerait la production de ces systèmes. A un coût cumulatif global de 12 millions de dollars environ pour les PWR et BWR, le coût marginal de réduction du risque — si l'on considère le système économique dans son ensemble — atteindrait le minimum représenté dans la figure 2. Le  $r_p$  effectif cumulant les effets sur la santé et les dépenses en main-d'œuvre est également porté sur le diagramme.

Il convient de remarquer que l'assimilation d'un effet dans le futur avec un effet au moment de la construction implique un jugement de valeur. Rejoignant les vues exprimées en [13], nous pensons qu'aucun facteur d'actualisation ne doit être appliqué aux effets futurs; un effet dans le futur doit donc être considéré comme aussi grave qu'un effet dans le présent. Toutefois, ceci introduit dans les calculs un élément pessimiste car on ne tient pas compte de la mise au point dans l'avenir de meilleures techniques de traitement médical.

Les présents calculs sont fondés sur des valeurs prévisionnelles et partent d'hypothèses spécifiques pour la sommation de risques collectifs différents. Les conclusions que tire cet article sont évidemment fonction de ces hypothèses. D'autres hypothèses pourraient aboutir à des résultats différents; cependant, la méthode générale reste valable et pourrait recevoir de nouvelles applications.

## RESUME

Le présent article avance l'idée que le risque total ne peut être réduit au-delà de toute limite donnée. A un certain point, les risques pour les travailleurs et la population liés à la production de matériel de sûreté deviennent plus importants que la réduction obtenue pour un risque existant. En nous fondant sur des données relatives à la République fédérale d'Allemagne, nous avons estimé que 1 équivalent-décès ou l'équivalent de 6000 journées de travail perdues sont la conséquence de la construction et de l'installation de matériel de sûreté d'un coût de 33 millions de dollars environ. En conséquence, des dépenses de sûreté consenties à un coût marginal de réduction du risque qui dépasse 33 millions de dollars par équivalent de vie sauvée conduiraient en fait à une augmentation du risque. On pourrait conclure qu'on visait à "trop" de sûreté. En outre, cette dépense représente un effort de 1400 hommes-années par équivalent de vie sans gain net pour la sûreté.

L'avantage de la méthode exposée ici est qu'elle décrit l'efficacité de la réduction du risque en termes physiques, c'est-à-dire en termes de risques pour les travailleurs et la population et de ressources de main-d'œuvre requises pour la production de matériel de sûreté, et que par là elle évite l'évaluation monétaire de la vie humaine.

## Références

- [1] US Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in the US Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Washington, DC (1975).
- [2] Canvey: An Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/Thurrock Area. Health & Safety Executive, Her Majesty's Stationery Office, Londres (1978).
- [3] Higson, D.J., The Development of Safety Criteria for Use in the Nuclear Industry. Presented at the Sixth National Chemical Engineering Conference in Queensland. Australie, 6-8 novembre (1978).

- [4] Tattersall, J.O., D.M. Simpson, and R.A. Reynolds. A Discussion of Nuclear Plant Safety with Reference to Other Hazards Experienced by the Community. Page 671, A/CONF. 49. Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche (1972).
- [5] Rowe, W.D., An Anatomy of Risk. John Wiley & Sons, New York (1977).
- [6] Sagan, L., Public Health Aspects of Energy Systems. In: H. Ashley, R.L. Rudman and C. Whipple (eds.), Energy and the Environment – A Risk-Benefit Approach pp. 87–111. Pergamon Press, New York (1976).
- [7] US Environmental Protection Agency. Environmental Radiation Protection Requirements for Normal Operations of Activities in the Uranium Fuel Cycle. EPA-520/4-76-016. Washington, D.C. (1976).
- [8] Linnerooth, J., The Value of Human Life: A Review of the Models. Economic Inquiry, **17**, 52–74, janvier (1979).
- [9] Siddall, E., A Rational Approach to Public Safety – An Interim Report. Canatom, Ltd., Toronto, Canada (1979).
- [10] Niehaus, F., Nettoenergiebilanzen – Ein Hilfsmittel zur Analyse von Energienutzungsstrukturen. Brennstoff – Wärme – Kraft, **10**, 396–400 (1975).
- [11] Niehaus, F., and H. Engelhardt. Vergleichende Darstellung atmosphärischer Schadstoffbelastungen. VDI-Bericht, **224**, 127–141 (1974).
- [12] Black, S.C., F. Niehaus, and D.M. Simpson. How Safe is "Too" Safe? WP-79-68, Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenbourg, Autriche (1979).
- [13] Cohen, J.J. and H.A. Tewes (1979), Development of Radiological Criteria for Nuclear Waste Management. IAEA-SR-36-22. Paper presented at the Topical Seminar on the Practical Implications of the ICRP Recommendations (1977) and the Revised IAEA Basic Standards for Radiation Protection. Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. David Simpson qui a signé avec eux la version plus technique de cet article citée parmi les références.