

CENTRE D'ETUDE SUR L'EVALUATION
DE LA PROTECTION DANS LE DOMAINE NUCLEAIRE



RAPPORT N° 275

**VALORISATION MONETAIRE DES IMPACTS
SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX D'UN
ACCIDENT NUCLEAIRE :**

**SYNTHESE DES ETUDES EXTERNE,
INTERETS ET LIMITES DE DEVELOPPEMENTS
COMPLEMENTAIRES**

Caroline SCHIEBER, Thierry SCHNEIDER

Septembre 2002

Contrat EDF P76/E01381/0

SIEGE SOCIAL ET ADMINISTRATIF :

ROUTE DU PANORAMA BP 48 F-92263 FONTENAY AUX ROSES CEDEX
TEL : +33 1 46 54 74 67 FAX : +33 1 40 84 90 34
E-MAIL : sec@cepn.asso.fr WEB : <http://www.cepn.asso.fr/>

ASSOCIATION DECLAREE CONFORMEMENT A LA LOI DU 1 JUILLET 1901 SIRET : 310 071 477 00031 N° DE TVA : FR60310071477

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES	V
RESUME	VII
INTRODUCTION	1
1. METHODE GENERALE D'EVALUATION DU COÛT EXTERNE DES ACCIDENTS NUCLEAIRES	3
1.1. Détermination de l'accident de référence	3
1.1.1. Estimation des probabilités de fusion du cœur d'un réacteur	4
1.1.2. Les scénarios de rejets	6
1.1.3. Estimation des conséquences d'un accident	9
1.2. Les éléments constitutifs du coût de l'accident	12
1.2.1. Le coût des contre-mesures	12
1.2.2. Le coût des effets sanitaires	18
1.2.3. Le calcul du coût externe de l'accident nucléaire	20
1.2.4. Les coûts indirects	21
1.2.5. La prise en compte de l'aversion au risque	24
2. LES EVALUATIONS DU PROJET EXTERNE	31
2.1. Méthodologie générale Externe	31
2.2. Implémentation française	35
2.3. Développements complémentaires	36
2.3.1. Prise en compte des coûts indirects	36
2.3.2. Prise en compte de l'aversion au risque	37
2.4. Comparaison avec d'autres études	39

3.	EXPLORATION D'AUTRES METHODES POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'AVERSION AU RISQUE	43
3.1.	L'approche "non-expected utility"	43
3.1.1.	La démarche générale	43
3.1.2.	La révélation des préférences concernant la fonction de transformation des probabilités	46
3.1.3.	Les limites concernant l'utilisation de la méthode	48
3.2.	La prise en compte des risques diversifiables	49
4.	LIMITES DES EVALUATIONS MONETAIRES DU COÛT EXTERNE DES ACCIDENTS NUCLEAIRES ET INTERETS DE DEVELOPPEMENTS COMPLEMENTAIRES	51
4.1.	Les dimensions de complexité dans l'évaluation du coût externe de l'accident	51
4.1.1.	Les dimensions scientifiques	51
4.1.2.	Les dimensions techniques	52
4.1.3.	Les dimensions sanitaires	52
4.1.4.	Les dimensions environnementales	53
4.1.5.	Les dimensions sociales	53
4.1.6.	Les dimensions économiques	54
4.2.	Les limites de l'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire	55
4.3.	Les évaluations complémentaires possibles pour le coût externe de l'accident nucléaire	56
	CONCLUSION	61
	REFERENCES	63
	ANNEXE 1 : LA PRISE EN COMPTE DES COÛTS INDIRECTS PAR L'UTILISATION DES TABLEAUX ENTREES-SORTIES DE LA COMPTABILITE NATIONALE	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Termes sources (en % de la radioactivité présente dans le cœur)	7
Tableau 2. Termes sources retenus dans l'étude d'intercomparaison AEN-CE	8
Tableau 3. Estimation des rejets radioactifs lors de l'accident de Tchernobyl	9
Tableau 4. Evaluation des impacts sanitaires - Modèle COSYMA	12
Tableau 5. Evaluation du coût de l'accident pour quatre scénarios de rejet.....	20
Tableau 6. Evaluation du coût externe de l'accident pour quatre scénarios de rejet.....	21
Tableau 7. Prise en compte des effets indirects dans l'évaluation du coût de l'accident.....	23
Tableau 8. Sensibilité du coefficient multiplicateur à appliquer au coût externe de l'accident aux scénarios d'accident et au coefficient d'aversion relative au risque	29
Tableau 9. Les scénarios retenus dans la méthodologie générale ExternE.....	32
Tableau 10. Paramètres économiques par défaut utilisés dans COSYMA pour le calcul du coût externe de l'accident dans ExternE.....	33
Tableau 11. Coût de l'accident ST2	34
Tableau 12. Coût externe de l'accident dans la méthodologie générale ExternE.....	35
Tableau 13. Coût externe de l'accident dans l'implémentation française	36
Tableau 14. Coût externe de l'accident avec prise en compte des coûts indirects	37
Tableau 15. Coût externe de l'accident avec prise en compte de l'aversion au risque	39
Tableau 16. Etudes internationales sur l'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire.....	41
Tableau 17. Développements complémentaires possibles pour l'évaluation du coût de l'accident nucléaire	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Résultats de quelques études probabilistes de sûreté : probabilité de fusion du cœur	5
Figure 2.	Cadre général pour le calcul des conséquences indirectes sur l'activité économique.....	22
Figure 3.	Représentation schématique d'une loterie	25
Figure 4.	La loterie associée à un accident nucléaire	28
Figure 5.	Résultats de différentes études internationales d'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire.....	42

RESUME

Ce rapport, réalisée par le CEPN, à la demande d'EDF/DRD, constitue une synthèse des différentes méthodes disponibles pour l'évaluation monétaire des impacts des accidents nucléaires en vue de mettre en évidence les impacts qui sont déjà monétarisés, ceux pour lesquels des développements complémentaires sont possibles et ceux pour lesquels l'approche monétaire semble actuellement rencontrer des limites et ne permet pas de refléter la complexité des situations rencontrées. Il s'appuie essentiellement sur la démarche adoptée dans le cadre du projet ExternE de la Commission Européenne consistant à évaluer les coûts externes des filières énergétiques, dont la filière nucléaire. En ce qui concerne cette filière, les principaux développements méthodologiques ont été finalisés en 1995, seules les questions relatives à la prise en compte de l'aversion au risque et des coûts indirects dans l'évaluation du coût de l'accident ont donné lieu à des développements complémentaires en 1997.

La méthode générale d'évaluation du coût externe d'un accident nucléaire comporte plusieurs étapes :

1. Détermination de l'accident de référence

- Estimation des probabilités de fusion du cœur d'un réacteur (retenue comme événement initiateur du scénario accidentel) ;
- Détermination des scénarios de rejets dans l'environnement (nécessitant de qualifier les différents termes source susceptibles d'être rejetés dans l'environnement suite à une fusion du cœur ainsi que les probabilités conditionnelles correspondantes) ;
- Evaluation des conséquences sanitaires et environnementales sur le court, moyen et long termes associées à chaque scénario de rejet dans l'environnement en tenant compte des contre-mesures adoptées pour la gestion post-accidentelle.

2. Evaluation monétaire des conséquences

- Estimation du coût des contre-mesures (mouvements de population, contre-mesures agricoles, décontamination,...)
- Estimation du coût des effets sanitaires radio-induits
- Estimation des coûts indirects pour l'économie

3. Calcul du coût externe de l'accident

- Multiplication du coût total de l'accident par la probabilité d'accident (par réacteur.an) rapporté à l'énergie produite par réacteur.an, pour obtenir un coût exprimé en mEuros/kWh.
- Prise en compte de l'aversion au risque : application d'un coefficient multiplicateur au coût externe ainsi obtenu.

L'évaluation économique des impacts sanitaires et environnementaux d'un accident, réalisée dans le cadre du projet ExternE, a permis d'obtenir un ordre de grandeur du coût externe de l'accident, pouvant être mis en perspective avec le coût externe total de la filière électronucléaire. Selon le terme source retenu, le coût externe de l'accident nucléaire se situe entre 0.1 mEuro/kWh et 0.002 mEuro/kWh. Il a par ailleurs été estimé

que la prise en compte de l'aversion au risque donne lieu à une multiplication par un facteur 20 du coût externe de l'accident?

Comme pour toute évaluation de ce type, des hypothèses restrictives ont dû être adoptées, soit par manque de données, soit par mesure de simplification des calculs. Les principaux paramètres qui seraient susceptibles de faire varier le coût externe de l'accident obtenu sont ceux liés aux probabilités d'occurrence de l'accident, au type de rejet considéré et à la valeur de la vie humaine retenue pour valoriser les impacts sanitaires.

Par ailleurs, il convient de garder à l'esprit les limites d'une telle évaluation. En effet, les dimensions de complexité associées aux conséquences d'un accident nucléaire rendent difficile l'appréhension de l'ensemble de ces conséquences dans une seule valeur monétaire. Ainsi, si la valeur du coût externe de l'accident est utile à des fins de mise en perspective de l'impact potentiel des filières énergétiques, il ne peut pas être utilisé pour obtenir une parfaite estimation de l'impact économique, environnemental et social d'un accident nucléaire. Pour mieux appréhender les impacts d'un tel accident, il conviendrait de poursuivre des développements, concernant notamment l'identification des acteurs qui seraient susceptibles de subir les coûts de l'accident et la définition d'indicateurs susceptibles de traduire les perturbations durables de l'environnement et de la vie économique.

INTRODUCTION

Depuis le milieu des années 1990, la Commission Européenne a développé la méthodologie ExternE afin de proposer une évaluation homogène des coûts externes sanitaires et environnementaux des différentes filières énergétiques en Europe. Depuis la publication des rapports méthodologiques en 1995, la Commission a suscité des développements complémentaires, notamment par rapport aux impacts environnementaux des filières thermiques classiques, ainsi que pour la mise en œuvre de la méthodologie dans différents contextes nationaux.

En ce qui concerne la filière nucléaire, les principaux développements méthodologiques ont été finalisés en 1995, seules les questions relatives à la prise en compte de l'aversion au risque et des coûts indirects dans l'évaluation du coût de l'accident ont donné lieu à des développements complémentaires en 1997.

L'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire est un élément sensible dans le coût externe de la filière nucléaire. Il pose la question de l'évaluation monétaire d'un risque d'accident à très faible probabilité et larges conséquences, celles-ci n'étant pas entièrement modélisables et quantifiables. Par ailleurs, dans les années 90, en particulier suite à l'accident de Tchernobyl, des développements ont été réalisés concernant les études de sûreté (évolution des termes sources et des probabilités), les contre-mesures pouvant être appliquées ou les effets à long terme d'un accident. Compte tenu de ces développements, il convient de s'interroger sur les intérêts et les limites de l'évaluation monétaire en termes de coûts externes, et sur l'opportunité de les réévaluer.

Cette note, réalisée par le CEPN, à la demande d'EDF/DRD, constitue une synthèse des différentes méthodes disponibles pour l'évaluation monétaire des impacts de la filière nucléaire pour les accidents en vue de mettre en évidence les impacts qui sont déjà monétarisés, ceux pour lesquels des développements complémentaires sont possibles et ceux pour lesquels l'approche monétaire semble actuellement rencontrer des limites et ne permet pas de refléter la complexité des situations rencontrées.

Après une présentation de la méthode générale retenue pour l'évaluation du coût externe d'un accident nucléaire (section 1), les évaluations réalisées dans le cadre de l'étude européenne ExternE sont détaillées en section 2. La section 3 est consacrée à une présentation succincte des méthodes développées en sciences économiques, potentiellement applicables pour évaluer l'aversion au risque associée à un accident

nucléaire. Une réflexion sur les limites de l'évaluation économique de l'impact sanitaire et environnemental d'un accident nucléaire est proposée en section 4, complétée par une présentation des développements complémentaires possibles et de leur intérêt selon que l'on se situe dans l'optique de l'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire, ou de l'amélioration de l'évaluation de l'ampleur des conséquences d'un accident en vue d'une préparation de la gestion post-accidentelle.

1. METHODE GENERALE D'EVALUATION DU COUT EXTERNE DES ACCIDENTS NUCLEAIRES

Dans le cadre des évaluations sur les coûts externes de la filière nucléaire, l'accident nucléaire majeur a été considéré exclusivement pour l'étape de production : ceci correspond aux accidents de fusion du cœur d'un réacteur de production d'électricité¹. Il convient de souligner que la sélection de la méthode la plus appropriée pour évaluer les coûts externes associés à un accident nucléaire a donné lieu à de nombreux débats, notamment après l'accident de Tchernobyl. Le débat a porté essentiellement sur la prise en compte ou non des probabilités d'occurrence des scénarios accidentels ainsi que sur le terme source de référence à retenir pour cette évaluation. Dans le cadre des développements réalisés pour l'évaluation des coûts externes pour la Commission Européenne, l'approche retenue consiste à calculer les conséquences sanitaires et environnementales de différents scénarios d'accident en pondérant par les probabilités d'occurrence de ces scénarios, puis à évaluer les conséquences économiques associées à ces scénarios et à prendre en considération l'aversion au risque face à ces scénarios.

Les deux sections suivantes présentent les démarches et les données retenues pour évaluer d'une part, les conséquences sanitaires et environnementales et, d'autre part, les conséquences monétaires.

1.1. Détermination de l'accident de référence

La démarche adoptée pour déterminer les conséquences sanitaires et environnementales des accidents consiste à évaluer l'espérance mathématique des conséquences des scénarios accidentels (appelée encore : "Expected damages"). Pour ce faire, on peut distinguer trois étapes :

- l'estimation des probabilités de fusion du cœur d'un réacteur (retenue comme événement initiateur du scénario accidentel) ;
- la détermination des scénarios de rejets dans l'environnement (nécessitant de qualifier les différents termes source susceptibles d'être rejetés dans

¹ Une analyse complémentaire a porté sur les accidents associés au transport des matières radioactives. Cependant, l'ampleur de tels accidents étant de nature tout à fait différente, la méthode d'évaluation de ces accidents ne sera pas présentée dans ce document.

l'environnement suite à une fusion du cœur ainsi que les probabilités conditionnelles correspondantes) ;

- l'évaluation des conséquences sanitaires et environnementales sur le court, moyen et long termes associées à chaque scénario de rejet dans l'environnement en tenant compte des contre-mesures adoptées pour la gestion post-accidentelle.

1.1.1. Estimation des probabilités de fusion du cœur d'un réacteur

Dans le domaine de la sûreté nucléaire, et plus particulièrement afin de déterminer le dimensionnement des réacteurs, des études probabilistes de sûreté ont été développées pour les différents types de réacteurs. Ces objectifs sont clairement affichés par exemple dans les études probabilistes de sûreté (EPS) menées par EDF et l'IPSN à la fin des années 1980 [1] :

"Imaginer le pire pour mieux prévenir ! Tel sont en définitive l'objet et l'objectif d'une EPS, tant il est évident que l'évaluation des points forts et des points faibles de la sûreté peut conduire à d'éventuelles améliorations de la sûreté au niveau de la conception ou de l'exploitation d'une installation nucléaire."

Ces remarques préliminaires visent à resituer dans leur contexte les études menées dans ce domaine. L'utilisation dans une optique de calcul des coûts externes des probabilités d'occurrence des scénarios accidentels publiées dans ces études doit se faire avec prudence. Ainsi, l'accident majeur de référence retenu dans le cadre des études de sûreté est celui conduisant à la fusion du cœur du réacteur². Ces études, visant à définir la probabilité d'occurrence annuelle de cet événement sont dénommées : "études probabilistes de sûreté de niveau 1". On notera que seuls les événements ayant une probabilité supérieure à 10^{-7} sont généralement retenus pour ce type d'évaluation [2].

Bien que les études de sûreté menées pour différents types de réacteurs soient délicates à comparer, il est possible de situer les résultats des études entre eux. Ainsi, parmi les études réalisées à la fin des années 1980 et début 1990, on peut considérer les études concernant les réacteurs à eau pressurisée américains (Surry, Sequoyah et Zion) [3], l'étude du réacteur à eau pressurisée allemand Biblis et les études menées en France

² On notera que d'autres événements initiateurs pourraient être envisagés mais sont considérés dans ce cas comme des scénarios "hors dimensionnement".

d'une part, sur le réacteur à eau pressurisée 900 MW (réacteur de type CP2) dite EPS900 par l'IPSN et, d'autre part, sur le réacteur à eau pressurisée 1300 MW (Paluel) dite EPS1300 par EDF [4]. Les probabilités de fusion du cœur obtenues dans ces études s'échelonnent entre : $3,7 \cdot 10^{-6}$ et $3,4 \cdot 10^{-4}$ par année.réacteur (voir Figure 1).

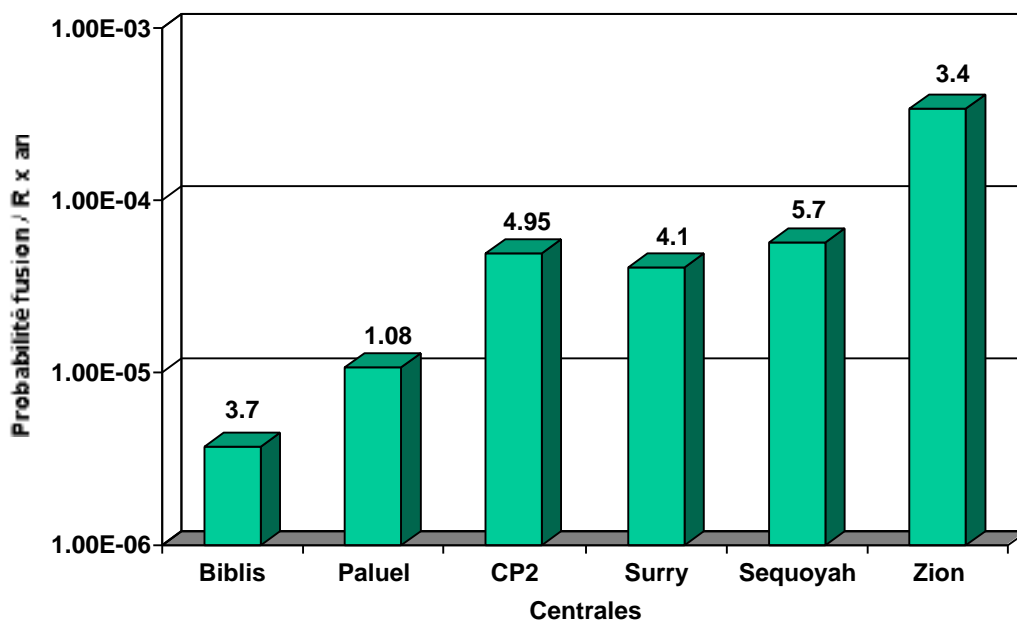


Figure 1. Résultats de quelques études probabilistes de sûreté : probabilité de fusion du cœur

En ce qui concerne les études probabilistes de sûreté menées en France, l'évaluation porte à la fois sur les risques de fusion lors du fonctionnement à pleine puissance du réacteur mais également lors des périodes d'arrêt du réacteur. Cette approche n'avait pas été retenue dans les autres études. Les valeurs obtenues sont de $4,95 \cdot 10^{-5}$ par année.réacteur pour un réacteur de 900 MW et de $1,08 \cdot 10^{-5}$ par année.réacteur pour un réacteur de 1300 MW (Paluel), avec une contribution pouvant atteindre 50% pour les phases d'arrêt. Ces valeurs françaises se situent dans la fourchette des valeurs obtenues dans ces différentes études. La différence observée entre l'EPS900 et l'EPS1300 reflète une amélioration sensible de la sûreté pour les réacteurs 1300 MW qui sont plus récents. Sur cette base, des aménagements ont été apportés dans les années 1990 afin de réduire significativement la probabilité de fusion du cœur pour les réacteurs CP2 (900 MW). Des réévaluations des études probabilistes de sûreté sont en cours et devraient permettre d'actualiser ces résultats qui datent de 1990.

1.1.2. Les scénarios de rejets

La seconde étape consiste à définir les termes sources susceptibles d'être rejetés dans l'environnement et les probabilités conditionnelles d'occurrence de ces scénarios de rejets. Si plusieurs études détaillées existent quant à l'évaluation de la probabilité de fusion du cœur, il n'en est pas de même en ce qui concerne les études permettant de définir les quantités rejetées dans l'environnement.

En effet, du point de vue de la sûreté, l'attention a porté principalement sur les causes de défaillance des systèmes techniques ou organisationnels susceptibles d'entraîner une fusion du cœur. L'objectif est alors d'adopter des options de conception visant à éviter tout ou partie des évolutions défavorables de ces situations. Au-delà de cet événement, plusieurs évolutions sont possibles conduisant soit à éviter tout rejet dans l'environnement, soit à relâcher une partie significative de la radioactivité présente dans le cœur du réacteur.

Dans les années 1970, une étude détaillée a été menée par les autorités américaines (US Nuclear Regulatory Commission) et a donné lieu au célèbre rapport de Rasmussen ou encore rapport WASH-1400 [5]. Cette étude a introduit trois classes d'accidents avec fusion du cœur due à des origines internes :

- accidents avec une rupture précoce de l'enceinte de confinement et rejets après quelques heures sans filtration (classé en terme source S1 en France) ;
- accidents avec une rupture différée de l'enceinte de confinement et rejets au plus tard 24 heures après la fusion du cœur sans filtration (classé en terme source S2 en France) ;
- accidents avec une rupture différée de l'enceinte de confinement et rejets au plus tard 24 heures après la fusion du cœur avec filtration (classé en terme source S3 en France).

Sur la base de cette classification, diverses évaluations des termes sources ont été proposées et discutées par les autorités de sûreté des différents pays. A titre indicatif des ordres de grandeur de ces termes sources, le Tableau 1 présente les rejets correspondants pour chaque terme source en pourcentage de la radioactivité présente dans le cœur du réacteur [2].

Tableau 1. Termes sources (en % de la radioactivité présente dans le cœur)

	S1	S2	S3
Gaz rares	80 %	75 %	75 %
Iode organique	0,6 %	0,55 %	0,55 %
Iode inorganique	60 %	2,7 %	0,3 %
Césium	40 %	5,5 %	0,35 %
Strontium	5 %	0,6 %	0,04 %

Dans le cas des réacteurs français, les autorités de sûreté retiennent comme terme source de référence S3, voire des valeurs inférieures d'un facteur 10. Elles justifient l'adoption de cette approche en mentionnant d'une part, les options de sûreté introduites à la conception des réacteurs français en cours d'exploitation et, d'autre part, les différentes améliorations apportées ces dernières années sur ces réacteurs afin de limiter les rejets en cas de fusion du cœur pour toute situation accidentelle, considérées dans le dimensionnement. Il convient également de noter qu'aucune donnée concernant des probabilités conditionnelles d'occurrence d'un scénario de rejets sachant fusion du cœur n'est disponible actuellement dans la littérature pour les réacteurs français.

Parmi les données publiées ces dernières années sur les termes sources pour des rejets après fusion du cœur, il convient de citer celles utilisées dans un exercice de comparaison entre des codes de calculs de conséquences mené conjointement par l'Agence de l'Energie Nucléaire (AEN/OCDE) et la Commission Européenne [6]. Ces données ont été définies de façon exhaustive (une liste d'une quarantaine de radionucléides est considérée) afin de permettre une évaluation des impacts et une analyse de sensibilité des résultats obtenus. Le réacteur de référence retenu est un réacteur de 1250 MW et quatre scénarios contrastés ont été considérés :

- un rejet total des gaz rares et un rejet de 10% des éléments les plus volatiles (césium, iode,...) - terme source noté ST2 ;
- un rejet de 10% des gaz rares et un rejet de 1% des éléments les plus volatiles (césium, iode,...) - terme source noté ST21 ;
- un rejet de 1% des gaz rares et un rejet de 0,1% des éléments les plus volatiles (césium, iode,...) - terme source noté ST22 ;
- un rejet de 0,1% des gaz rares et un rejet de 0,01% des éléments les plus volatiles (césium, iode,...) - terme source noté ST23.

On notera que dans ces scénarios, les rejets sont supposés intervenir 2 heures après la fusion du cœur et leur durée est d'une heure. Le Tableau 2 présente les fractions rejetées pour ces différents scénarios³.

Tableau 2. Termes sources retenus dans l'étude d'intercomparaison AEN-CE

Catégorie de rejet	Fraction rejetée de l'inventaire du cœur					
	Gaz rares	I	Cs	Te	Métaux alcalino-terreux et métaux nobles	Oxydes métalliques
ST2	1	0,1*	0,1	0,1	0,01	0,01
ST21	0,1	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001
ST22	0,01	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,0001
ST23	0,001	0,0001	0,0001	0,0001	1.10 ⁻⁵	1.10 ⁻⁵

* *I organique* : 0,001

Du point de vue des probabilités conditionnelles d'occurrence de différents scénarios de rejets sachant fusion du cœur, peu de données sont disponibles. L'étude la plus complète provient des autorités américaines [3]. De façon simplifiée, on peut déduire de cette étude les probabilités conditionnelles suivantes :

- rupture majeure de l'enceinte de confinement après fusion du cœur (scénarios ST2, ST21 ou ST22) : 19 %
- fusion du cœur sans endommagement de l'enceinte de confinement (scénario ST23) : 81 %

A titre de comparaison, les termes sources présentés ci-dessus peuvent être mis en perspective avec les estimations concernant les rejets effectués lors de l'accident de la centrale de Tchernobyl. De façon simplifiée, on estime que la quantité rejetée lors de l'accident (en dehors des gaz rares) correspond environ à 30 % de l'activité présente dans le réacteur. Le Tableau 3 présente une estimation de ces rejets publiée par l'Agence de l'Energie Nucléaire de l'OCDE [7].

³ Pour une présentation plus détaillée des termes sources, on se reportera au rapport CEPN n°234 [9].

Tableau 3. Estimation des rejets radioactifs lors de l'accident de Tchernobyl

	% des rejets par rapport à l'inventaire total
Xénon 33	100 %
Iode 131	50 - 60 %
Césium (134 et 137)	20 - 40 %
Téllurium 132	25 - 60 %
Strontium	4 - 6 %

1.1.3. Estimation des conséquences d'un accident

Afin d'estimer les conséquences d'un accident sur une installation conduisant à des rejets radioactifs dans l'environnement, il convient de recourir à des modèles de calculs estimant l'évolution de ces rejets dans l'environnement puis leurs effets sur la santé et l'environnement dans l'espace et dans le temps. Au début des années 1990, la Commission Européenne a soutenu le développement du code COSYMA (développé conjointement par le NRPB au Royaume Uni et FZK en Allemagne). Celui-ci a été largement utilisé au milieu des années 1990 d'autant plus qu'une version pour micro-ordinateur a été développée. Actuellement, d'autres codes sont disponibles tels que le code MACSS (développé aux Etats-Unis) ou encore le système RODOS (système soutenu par la Commission Européenne et intégrant l'ensemble des modélisations de transfert dans l'environnement permettant d'assurer à la fois la gestion de crise (en temps réel) et les évaluations à moyen et long terme). On notera que la principale différence entre ces différents modèles concerne essentiellement la précision des modèles de transfert ainsi que leur capacité à prendre en considération l'efficacité des contre-mesures mises en œuvre au cours du temps pour limiter les effets attendus d'une contamination durable de l'environnement.

Le code COSYMA comprend trois modules combinant à la fois la distance et le temps :

- un module dit "Near Early - NE", qui concerne la phase accidentelle (les premières semaines après l'accident) et se limite à la zone des 100 premiers kilomètres ;
- un module dit "Near Late - NL", qui prend en considération pour cette zone des 100 premiers kilomètres les effets liés à la contamination durable de la zone pendant une période de 200 ans après l'accident ;

- un module dit "Far Late - FL", qui prend en considération les effets, pendant 200 ans, au-delà de la zone des 100 premiers kilomètres et s'étend jusqu'à 3000 kilomètres.

Du point de vue de la modélisation, on notera que le code COSYMA intègre un modèle de dispersion atmosphérique spécifique pour le champ proche et un autre pour les transferts sur longue distance. De plus, les calculs sont réalisés à partir des données météorologiques pour des périodes annuelles afin de simuler l'évolution possible du transport du nuage radioactif et des dépôts correspondants sur l'ensemble des distances considérées. Il convient de souligner que l'évaluation proposée par ce modèle se limite aux transferts de la radioactivité par l'atmosphère, puis prend en considération les voies de transfert via la chaîne alimentaire. Cependant, il ne permet pas de modéliser les transferts par remise en suspension dans l'environnement suite à un dépôt sur le sol ou encore le transfert par les rivières et les sédiments. Ce type d'approche a par contre été considérée dans les derniers développements du système RODOS, mais nécessite des informations beaucoup plus détaillées.

Du point de vue des voies d'exposition, le modèle COSYMA prend en considération :

- l'exposition externe et l'inhalation lors du passage du nuage radioactif ;
- l'exposition externe due aux dépôts sur la peau, les habits ou le sol ;
- l'inhalation liée aux matières remises en suspension ;
- l'ingestion liée à la contamination de la chaîne alimentaire.

Du point de vue de la prise en compte des contre-mesures, le modèle COSYMA retient :

- l'évacuation, le confinement et la distribution des tablettes d'iode des populations à proximité de l'installation (jusqu'à 24 kilomètres du point de rejet) pour la situation accidentelle (durant les premières semaines après l'accident) ;
- le relogement (pour les zones se situant jusqu'à 100 kilomètres) et l'introduction de restrictions quant à l'utilisation des productions agricoles (jusqu'à 3000 kilomètres) pour la gestion post-accidentelle (évaluée généralement sur les deux premières années du point de vue des restrictions).

Ces contre-mesures sont limitées dans ce modèle aux grandes catégories :

- Du point de vue de la distribution des tablettes d'iode, il est retenu une distribution systématique dans un rayon de 1,8 kilomètre autour du point de rejet.
- En ce qui concerne l'évacuation des populations, les critères retenus sont ceux de la publication 40 de la CIPR : 50 mSv au corps entier et 200 mSv à la thyroïde. Il s'agit de doses prises pendant la période accidentelle, c'est-à-dire sur quelques jours. La durée moyenne de l'évacuation est estimée à environ 3 jours.
- Pour le relogement, la valeur retenue est de 50 mSv par an (dose estimée en dehors de la période accidentelle).
- Pour la mise en œuvre des contre-mesures agricoles, les valeurs adoptées s'expriment en fonction de la concentration des radionucléides dans les aliments (essentiellement du Césium dans le cas de Tchernobyl). La valeur adoptée est de 1000 Bq/kg, valeur qui correspond à la norme de commercialisation des produits agricoles en Europe.

Des analyses plus détaillées permettant de prendre en considération différentes stratégies sur le plan de la gestion de la production agricole dans un territoire contaminé ont en fait été introduites ultérieurement dans le système RODOS.

Du point de vue des effets sanitaires, le calcul est effectué dans le modèle COSYMA à partir des doses collectives calculées pour les populations exposées dans ces territoires et de la relation dose-effet publiée par la CIPR.

En considérant les termes sources ST2, ST21, ST22 et ST23 présentés ci-dessus, les doses collectives et les effets sanitaires suivants ont été estimés avec le modèle COSYMA, pour un rejet accidentel au centre de l'Allemagne (zone à forte densité de population) et un rejet effectué deux heures après la fusion du cœur pendant une durée d'une heure (Tableau 4).

Tableau 4. Evaluation des impacts sanitaires - Modèle COSYMA

Terme source Zone *	Dose collective (H.Sv)	Nb de cancers mortels	Nb de cancers non mortels	Nb d'effets héréditaires sévères	Nb de maladies précoces	Nb de morts précoces
ST2						
local	59 200	2 962,0	7 108,8	592,4	138,0	9,0
régional	232 000	11 575,0	27 780,0	2 315,0	-	-
ST21						
local	8 200	410,0	984,0	82,0	2,4	0,0
régional	50 100	2 505,0	6 012,0	501,0	-	-
ST22						
local	1 280	63,9	153,2	12,8	0,0	0,0
régional	10 900	544,0	1 305,6	108,8	-	-
ST23						
local	213	10,6	25,5	2,1	0,0	0,0
régional	1 630	81,5	195,6	16,3	-	-

* La zone locale correspond à un rayon de 100 km autour de la centrale. La zone régionale correspond à un rayon entre 100 km et 3000 km autour de la centrale

1.2. Les éléments constitutifs du coût de l'accident

Cette section présente les coûts ayant été identifiés pour le calcul du coût d'un accident, soit dans des modèles informatiques de calcul des impacts des accidents (modèle COSYMA [8], utilisé notamment dans les premières évaluations de l'étude ExternE [9] et modèle RODOS développé dans le cadre des programmes de recherche de la Commission Européenne⁴ [10]), soit dans les développements complémentaires réalisés dans le cadre de ExternE [11], soit dans la synthèse réalisée par l'Agence pour l'Energie Nucléaire de l'OCDE sur les conséquences économiques des accidents nucléaires [12].

1.2.1. Le coût des contre-mesures

Trois grandes catégories de contre-mesures peuvent être distinguées :

- Les contre-mesures consistant à déplacer les populations exposées ou susceptibles de l'être, et ce, sur des périodes de temps plus ou moins longues.

⁴ Le module économique du modèle RODOS est encore en cours de développement. Il est basé principalement sur le module économique de COSYMA en y ajoutant des éléments relatifs aux techniques de décontamination et aux contre-mesures agricoles de moyen et long terme.

- Les contre-mesures destinées à réduire la contamination provenant des denrées agricoles (à court ou moyen terme).
- Les contre-mesures de moyen à long terme consistant à appliquer des techniques de décontamination des sols et/ou des habitations.

1.2.1.1. Les coûts associés aux déplacements de population

Les déplacements de population prévus dans les plans d'urgence associés aux accidents nucléaires, ont pour objectif d'éloigner de façon temporaire ou définitive les individus des zones contaminées. Pour le court terme, il s'agit essentiellement d'évacuer les personnes situées dans la zone touchée par l'accident, et de les reloger temporairement (quelques jours). En cas de contamination élevée et durable de l'environnement, l'évacuation temporaire se transforme en relogement des populations pour une longue durée (quelques semaines à plusieurs mois), voire de façon définitive.

Sans exclure d'autres impacts possibles, les coûts de ce type de contre-mesures peuvent être ventilés dans les grands postes suivants :

- Transports pour quitter la zone touchée.
- Hébergement et restauration provisoires.
- Perte de revenu pour les personnes se trouvant dans l'incapacité de rejoindre leur lieu de travail.
- Perte en capital et en investissements pour les terres et autres biens.

Coûts du transport pour quitter la zone touchée

Les coûts de transport peuvent être estimés sur la base du nombre de personnes évacuées, de la distance d'évacuation et du type de transport utilisé (privé ou public). Le coût par personne associé à l'évacuation est en général moins élevé que celui associé au relogement, car ce dernier peut inclure le fait d'avoir à déménager les biens des personnes, ce qui, dans le cas de l'évacuation temporaire, n'est pas effectué.

Coûts de l'hébergement et de la restauration temporaires

Dans l'évaluation du coût du logement au cours des phases d'évacuation et de relogement, trois facteurs interviennent : le coût correspondant à la perte du bénéfice procuré par l'ancien logement (temporairement perdu), le coût du nouveau logement d'urgence et les bénéfices éventuels associés au nouveau logement.

Pour éviter les doubles comptes, le module économique de COSYMA, évalue uniquement le coût associé au logement quitté (coût subi par la population évacuée), en se basant sur un prix moyen de logement par personne évalué soit par la partie du PIB concernant le secteur du logement, soit à partir de la valeur du marché des habitations.

Le module économique de RODOS considère le coût du nouveau logement sur la base d'une estimation des coûts d'hébergement et de repas.

Coûts liés à la perte de revenu

Si les populations évacuées ou relogées sont dans l'impossibilité de se rendre à leur travail, leur contribution à l'économie sera perdue, ce qui peut arriver aussi en cas de confinement.

La méthode la plus simple pour estimer cette perte est de l'évaluer sur la base du PIB par habitant et par an, en considérant la période d'évacuation (ou de relogement) et le nombre de personnes concernées (méthode retenue dans COSYMA).

Il est également possible d'évaluer la perte de revenu en fonction de la surface évacuée, sur la base d'une estimation du PIB/km².

Coûts de la perte de capital

Au cours d'une période de relogement de longue durée, des individus peuvent retrouver un emploi, ce qui signifie que les coûts liés à la perte de revenu disparaissent. Après ce retour à une activité professionnelle, le seul coût qui subsiste est celui correspondant à la perte d'usage du capital sous forme de terrains et d'actifs. Cette perte présente deux composantes : la perte des intérêts sur l'investissement original et la dépréciation que subit le capital pour diverses raisons (dégradation d'installations non utilisées, perte de valeur due à la dégradation de l'environnement, ...).

Ces coûts dépendent de la valeur initiale du terrain et des actifs immobiliers associés ainsi que de la durée de non utilisation. L'estimation de cette valeur au moment de l'accident est habituellement ventilée en différentes catégories en fonction des données statistiques disponibles. Le module économique de COSYMA prévoit une ventilation en quatre classes :

- Le capital non résidentiel (à l'exclusion du logement et des biens de consommation durables).
- Le logement.
- Les biens de consommation durables.
- Les terrains.

Un taux de dépréciation est appliqué pour les capitaux, à l'exception des terrains, pour lesquels il est fait l'hypothèse qu'ils ne subissent pas de dévalorisation.

1.2.1.2. Les coûts associés aux restrictions et contre-mesures agricoles

Ces coûts proviennent de l'application de restrictions de la production ou de la consommation de denrées alimentaires dont les niveaux de radioactivité dépassent certains seuils, ou d'autres contre-mesures mises en place pour réduire les niveaux de contamination des produits agricoles. Ces seuils, qui doivent être définis par les pouvoirs publics, sont en fait les paramètres déterminants de ces coûts et sont d'ailleurs fixés en fonction du coût de leur application.

Les principales contre-mesures agricoles considérées sont :

- La destruction, ou l'arrêt de production de denrées alimentaires.
- La transformation de denrées alimentaires pour diminuer leur contamination.
- Le remplacement des denrées alimentaires des animaux.
- Le stockage de denrées alimentaires pour bénéficier de la décroissance radioactive naturelle avec le temps.

A ces coûts s'ajoutent ceux liés à la perte de valeur du capital agricole (terres et stocks) pendant les périodes de relogement ou en raison d'une évacuation définitive.

Coûts de la perte de production de denrées alimentaires

Ce coût est à prendre en compte en cas d'interdiction de la vente de denrées alimentaires (récoltes, viande,...). Il est fonction du type de denrée perdue. Le coût unitaire par kg.an est estimé dans COSYMA à partir du PIB par unité de produit agricole. Dans RODOS, le coût est estimé à partir du prix unitaire de vente de chaque type de denrée considérée.

Coût de la destruction du stock de produits agricoles

Les denrées déjà produites et ne pouvant pas être vendues sont soit détruites, soit considérées comme des déchets radioactifs (d'où un coût spécifique de déchet).

Le module économique de COSYMA ne considère qu'un coût de destruction du lait, estimé par le coût du transport quotidien du lait vers son lieu de destruction, pendant 100 jours. Il est supposé que les récoltes et les animaux restent sur place.

Dans le module économique de RODOS, un coût de stockage de déchet par kg a été estimé.

Coûts de transformation des denrées alimentaires

Ce coût est considéré dans le module économique de RODOS qui prévoit la transformation du blé et du seigle en farine, ainsi que la transformation du lait en fromage. L'évaluation du coût unitaire a été réalisée en soustrayant du prix de vente d'une unité de denrée transformée (ex. 1 kg de farine), le prix de vente de la quantité de denrée initiale (ex.1,4 kg de blé) nécessaire pour produire une unité de denrée transformée.

Coûts de stockage des denrées alimentaires

Ce coût est considéré dans le module économique de RODOS. Il est fonction du type de stockage (à température ambiante, en zone réfrigérée, par congélation), et de la durée du stockage. Un coût unitaire par kg et par jour de denrée stockée est estimé pour les principaux types de récoltes agricoles, pour la viande, et les productions laitières (lait, beurre, fromage...).

Coûts d'approvisionnement en denrées de remplacement pour les animaux

Ce coût est considéré dans le module économique de RODOS. Il est basé sur le prix de vente unitaire des denrées de remplacement dédiées aux différents types de bétail considérés.

Coûts de la perte de service du capital des terres et des stocks

Si les restrictions alimentaires se maintiennent longtemps, il est nécessaire de tenir compte du fait que l'économie ne se rétablira que progressivement. Il est ainsi possible que la perte de valeur en capital de l'exploitation, de la terre et de ses actifs se poursuive.

Le modèle COSYMA intègre cette donnée de coût en estimant la surface des terres qui restent indisponibles à partir des volumes de produits agricoles perdus. La valeur du capital agricole est fonction du type de denrée produite (récolte, bétail, lait) et du type de capital (résidentiel ou non résidentiel).

1.2.1.3. Les coûts associés à la décontamination

La décontamination permet un retour plus rapide des niveaux de la radioactivité ambiante aux valeurs antérieures à l'accident. Cette contre-mesure influe donc sur la durée d'interdiction de la zone évacuée, mais également sur le niveau d'exposition de la population.

Les coûts de la décontamination comprennent :

- le coût des opérations de nettoyage, y compris les équipements et produits nécessaires, ainsi que de l'élimination et du transport des déchets résultants ;
- le coût de la main d'œuvre nécessaire ;
- éventuellement, le coût des effets sanitaires sur le personnel de décontamination.

Les coûts de la décontamination peuvent varier de façon sensible selon le niveau de contamination ou la réduction du débit de dose recherchée et selon l'environnement (par exemple, urbain, résidentiel ou rural) à décontaminer.

Le module économique de COSYMA considère un coût unitaire de décontamination fonction de la surface devant être décontaminée. Le modèle RODOS intègre des coûts spécifiques à chaque technique de décontamination.

1.2.2. Le coût des effets sanitaires

L'exposition aux rayonnements ionisants peut provoquer directement trois catégories principales d'effets sanitaires :

- les effets précoces : morts précoces ou maladies ;
- les effets latents : cancers mortels et non mortels ;
- les effets héréditaires.

L'estimation du coût économique correspondant au nombre prévu d'effets sanitaires radioinduits représente une part importante de l'évaluation des conséquences économiques globales d'un accident. Cependant, la quantification des dommages à la santé est matière à controverse, car, si elle requiert en principe d'attribuer une valeur monétaire à la vie humaine, tous les coûts des effets sanitaires dont la liste suit ne se prêtent pas à une évaluation directe :

- les coûts directs des soins médicaux ;
- les coûts indirects dus à la perte de revenu pendant le traitement et la convalescence ou à la perte totale de revenus futurs, prévue dans le cas d'un décès ;
- des coûts non monétaires, comme la douleur, le chagrin et la souffrance, associés à chaque effet.

Plusieurs approches ont été mises au point, qui se différencient essentiellement par la quantification, plus ou moins poussée, des facteurs non monétaires. On peut établir des coûts de référence pour mesurer l'impact des effets sanitaires sur l'économie. Cela suppose que l'on évalue les coûts du traitement de l'effet en question et de ses impacts indirects sur l'économie, tels que le fait que l'individu ne fasse plus partie de la population active, temporairement ou définitivement. Cette méthode est appelée approche du capital humain. L'intégration des facteurs non monétaires s'avère difficile, car on a besoin d'informations sur les proportions relatives de la douleur, du chagrin et

de la détresse associées à chaque effet. Des méthodes d'évaluation de la perte subjective, comme le consentement à payer, seraient dans ce cas mieux adaptées.

Approche du capital humain

Cette méthode permet d'évaluer les coûts qui ont un effet mesurable direct sur l'économie et ainsi de définir un coût de référence utile. Elle permet ainsi d'estimer le coût du traitement médical en fonction du type d'effet sanitaire, ainsi que la perte de revenu associée à la maladie ou au décès.

La détermination des coûts du traitement, de l'hospitalisation et des médicaments est réalisée le plus souvent à partir de données moyennes estimées par les organismes de santé en fonction du type de maladie considérée.

En ce qui concerne la perte de revenu, l'approche du capital humain se base sur le nombre d'années de vies perdues, dues à la maladie ou au décès, en affectant une valeur monétaire à l'année de vie perdue. Cette valeur est déduite de la contribution moyenne d'un individu à l'économie du pays, et basée sur le PIB annuel par habitant.

D'une manière générale, il est considéré que pour un effet non mortel, l'équivalent du détriment exprimé en termes de perte d'espérance de vie est de l'ordre de 0,1 année. Pour les effets mortels précoces, la perte d'espérance de vie est déduite de la moyenne de l'espérance de vie de la population considérée (ex. 42 ans en France). Pour les cancers mortels liés à l'exposition aux rayonnements ionisants, la perte d'espérance de vie est de l'ordre de 16 années en moyenne.

L'approche du consentement à payer

Cette approche permet d'intégrer des facteurs non économiques (anxiété, douleur, aversion au risque,...) dans l'évaluation de la valeur monétaire de la vie humaine, en estimant le montant que les individus seraient disposés à payer pour réduire le risque d'occurrence d'un effet sanitaire, ou le montant qu'ils seraient disposés à accepter en contrepartie de l'augmentation de ce risque.

Plusieurs méthodes ont été employées pour déterminer ces montants, y compris des techniques de sondage et de révélation des préférences. Les valeurs obtenues varient en fonction du type d'effet sanitaire et du contexte dans lequel ces effets surviennent.

1.2.3. Le calcul du coût externe de l'accident nucléaire

Après avoir estimé le coût total associé à l'accident, il est nécessaire de rapporter ce coût à la probabilité de l'accident (donnée par réacteur.an), puis de l'exprimer par unité d'énergie produite, en estimant l'énergie produite par réacteur.an.

A titre d'illustration, le Tableau 5 présente, pour les quatre scénarios d'accident décrits précédemment, l'évaluation du coût associé à l'accident suivant la méthodologie générale ExternE (les principales hypothèses de calcul du coût sont présentées en section 2). Dans cette évaluation, réalisée à partir de COSYMA, les pertes de revenus (dus à l'évacuation ou au relogement) ont été estimées sur 2 ans, les pertes de capital (dus au relogement ou aux restrictions agricoles) ont été considérées sur la deuxième et troisième années. Ces coûts ont été actualisés à un taux de 7 %. Les coûts des effets sanitaires ont été estimés à partir des valeurs Externe affectées aux effets fatals et non fatals. Ces coûts n'ont pas fait l'objet d'une actualisation (bien qu'il soit possible de le faire dans COSYMA). Le Tableau 6 donne le résultat en termes de coût externe.

Tableau 5. Evaluation du coût de l'accident pour quatre scénarios de rejet

Terme source	Coût total des effets sanitaires (MEuros ₁₉₉₅)	Coût total des restrictions agricoles (MEuros ₁₉₉₅)	Coût total de l'évacuation et du relogement (MEuros ₁₉₉₅)	Coût de l'accident (MEuros ₁₉₉₅)
ST2				
local	11 044,1	824,4	1 515,2	
régional	43 059,0	26 809,6	-	83 252
ST21				
local	1 525,2	330,7	98,1	
régional	9 318,6	5 820,0	-	17 093
ST22				
local	237,5	86,0	13,5	
régional	2 023,7	978,0	-	3 339
ST23				
local	39,6	13,7	10,9	
régional	303,2	63,6	-	431

Tableau 6. Evaluation du coût externe de l'accident pour quatre scénarios de rejet

Terme source *	Probabilité de fusion du cœur (réacteur.an) ⁻¹	Probabilité conditionnelle	Coût total (MEuros)	Coût x probabilité (MEuros / réacteur.an)	Coût externe (mEuros ¹⁹⁹⁵ par kWh ^{**})
ST2	5 E-05	0.19	83 252	0,790	0,104
ST21	5 E-05	0.19	17 093	0,162	0,021
ST22	5 E-05	0.19	3 339	0,032	0,0042
ST23	5 E-05	0.81	431	0,017	0,0023

* Les scénarios ST2, ST21 et ST22 correspondent aux trois scénarios possibles suite à une rupture majeure de confinement après fusion du cœur. Le scénario ST23 correspond à une fusion du cœur sans rupture de confinement. En termes de probabilité conditionnelle, il convient de prendre l'un des 3 premiers scénarios et le dernier pour avoir une somme égale à 1.

** 7,6 TWh / réacteur.an pour les termes source d'un réacteur de 1200 MWe

1.2.4. Les coûts indirects

Les coûts des contre-mesures et des effets sanitaires constituent des coûts directs sur l'économie, estimés au niveau local. Il est important, dans l'évaluation du coût associé à un accident nucléaire, de tenir également compte de l'impact au niveau macro-économique, de la perturbation, voire de l'arrêt de l'activité économique dans la région affectée par l'accident. Il s'agit ainsi de mesurer les répercussions de l'accident sur l'emploi, la valeur ajoutée, les dépenses et les recettes de l'État, l'industrie touristique et la balance des paiements.

Une des méthodes proposées pour cette évaluation consiste à utiliser les tableaux d'entrées-sorties fournis par la comptabilité nationale pour estimer comment une variation initiale de production dans un secteur de l'économie donné impacte successivement la valeur ajoutée, les revenus, la demande de biens et services, et à nouveau la production, jusqu'à ce que l'équilibre économique soit retrouvé (voir Figure 2 et Annexe 1).

Il doit être noté que ce mécanisme est représentatif d'une situation où les territoires affectés par l'accident sont d'une taille significative comparée à la région pour laquelle l'activité économique est considérée. Dans le cas d'un accident de faible ampleur, la

perte des capacités de production serait en principe rapidement compensée par une augmentation de l'activité économique régionale.

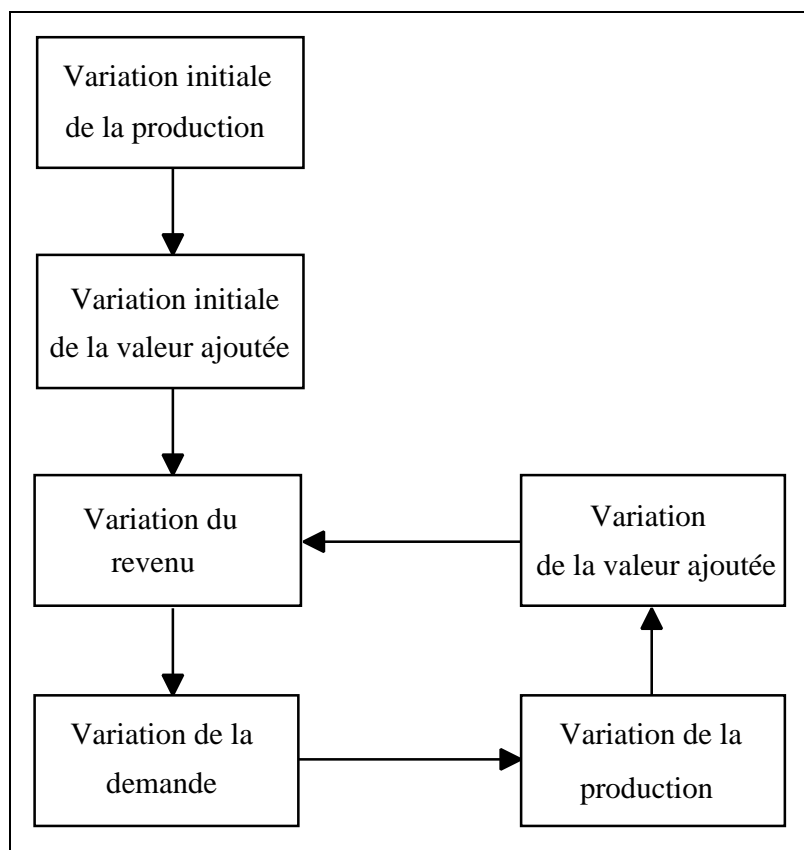


Figure 2. Cadre général pour le calcul des conséquences indirectes sur l'activité économique

En pratique, l'application de la méthode nécessite de compiler les tableaux d'entrées-sorties adéquats par rapport aux secteurs de l'économie touchés, et à la région économique concernée. Bien que des calculs détaillés puissent être réalisés pour chaque scénario d'accident, il est possible d'adopter un ensemble d'hypothèses génériques appliquées à un scénario d'accident type, afin d'obtenir un ordre de grandeur des coûts indirects, et de suggérer l'adoption d'un coefficient multiplicateur devant être appliqué au coût total de l'accident (hors effets indirects).

Dans ce but, une étude a été menée dans le cadre du projet ExternE, considérant un accident hypothétique à la centrale nucléaire de Nogent sur Seine (France), donnant lieu

à un rejet de l'ordre de 10 % du cœur [13]. Les coûts indirects ont été calculés pour la région administrative "Champagne-Ardenne", après une estimation du coût direct de l'accident basée sur l'utilisation du code de calcul COSYMA.

A partir de la perte de valeur ajoutée brute initiale due à l'accident, l'estimation a été faite de la perte supplémentaire de valeur ajoutée induite par la perturbation de l'économie régionale. Les résultats montrent que la perte de valeur ajoutée brute est augmentée de l'ordre de 66 %.

Le Tableau 7 ci-après présente les coûts estimés de l'accident, avec et sans prise en compte des effets sanitaires, et leur variation en fonction de la prise en compte de l'augmentation de perte de valeur ajoutée brute.

Tableau 7. Prise en compte des effets indirects dans l'évaluation du coût de l'accident

	Coût accident taux d'actualisation : 0 %			Coût accident taux d'actualisation : 3 %		
	Coût initial	Coût avec effets indirects	Δ (%)	Coût initial	Coût avec effets indirects	Δ (%)
	(MEuros ₁₉₉₄)	(MEuros ₁₉₉₄)		(MEuros ₁₉₉₄)	(MEuros ₁₉₉₄)	
Sous-total	4 672	6 298	+ 35 %	4 461	6 010	+ 35 %
<i>dont perte de VAB</i>	<i>2 464</i>	<i>4 090</i>	<i>+ 66%</i>	<i>2 346</i>	<i>6 895</i>	<i>+ 66%</i>
Effets sanitaires	12 685	12 685		2 721	2 721	
Total	17 356	18 982	+ 9%	7 183	8 731	+ 22%

L'augmentation de perte de valeur ajoutée se traduit donc par une augmentation de l'ordre de 35 % du coût total de l'accident estimé hors effets sanitaires, et par une augmentation de 10 % et 22 % du coût total avec effets sanitaires pour un taux d'actualisation respectif de 0 % et 3 %.

Cette étude a ainsi permis d'obtenir une première évaluation de l'ordre de grandeur des effets indirects sur l'économie régionale. Elle ne prend cependant en compte que l'impact de la perte de valeur ajoutée brute au niveau de la région. Les impacts secondaires dus aux effets sanitaires ou à la destruction de la centrale, ainsi que les impacts sur les autres régions avoisinantes ne sont pas inclus dans cette évaluation.

Pour l'intégration de ces résultats ainsi que ceux d'autres études (voir Annexe 1) dans les études de coût externe des accidents, il a été suggéré de retenir comme ordre de grandeur, une augmentation de 25 % du coût direct local, et ainsi d'appliquer un coefficient multiplicateur de 1,25 au coût externe local des accidents nucléaires pour tenir compte des effets indirects sur l'économie, un calcul spécifique pour chaque situation n'étant pas envisageable [11].

1.2.5. La prise en compte de l'aversion au risque

Une des critiques apportées à l'évaluation monétaire du coût externe des accidents sur la base de l'approche probabiliste, est la non prise en compte de la perception du risque par les individus, conduisant ainsi à une sous-estimation du "coût social" de l'accident. Il est ainsi apparu nécessaire d'intégrer une dimension d'aversion au risque dans le calcul du coût externe [14].

1.2.5.1. Méthodologie

La méthode proposée pour intégrer l'aversion au risque dans le calcul du coût de l'accident est basée sur la théorie économique de l'utilité espérée (ou expected utility), par laquelle, dans une situation à risque (différentes probabilités associées à différents niveaux de richesse finale), la valeur espérée de la richesse finale (simple multiplication des probabilités et des conséquences) est remplacée par l'utilité apportée par cette richesse (multiplication des probabilités par la fonction d'utilité associée aux conséquences) [11, 15]. La fonction d'utilité caractérise alors le comportement des individus face au risque.

Evaluation d'une loterie binaire :

Une situation à risque peut être modélisée par une "loterie", c'est-à-dire un ensemble de probabilités associées à diverses conséquences en termes de richesse finale.

Soit un individu faisant face à une situation où il a une probabilité p d'avoir sa richesse W diminuée de $X\%$, et une probabilité $(1-p)$ de ne rien perdre (Figure 3).

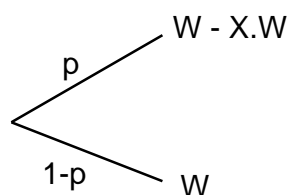


Figure 3. Représentation schématique d'une loterie

Dans l'approche de l'utilité espérée, cette loterie est évaluée par son "équivalent certain", c'est-à-dire par le niveau de richesse certaine (sans risque) qui donnerait à l'individu ayant une fonction d'utilité $U(W)$ la même satisfaction que la loterie. Autrement dit, on cherche à évaluer la fraction de richesse M que l'individu est prêt à perdre de façon certaine plutôt que d'avoir à subir la loterie.

La situation à risque est évaluée par l'espérance d'utilité de la loterie :

$$E[U] = (1-p) U(W) + p U(W - XW)$$

La fraction de richesse M que l'individu est prêt à perdre de façon certaine est donnée par la résolution de l'équation qui égalise la valeur de la loterie ($E[U]$) et la valeur de la perte certaine ($U(W-MW)$) :

$$E[U] = U(W-MW)$$

C'est la forme de la fonction d'utilité retenue qui traduit le comportement face au risque, et notamment le degré d'aversion au risque⁵. D'un point de vue théorique, plusieurs types de fonction d'utilité ont été étudiés, en fonction des attitudes des individus face au risque. Des études empiriques ont également permis d'estimer le degré d'aversion au risque en fonction du type de risque. Celles-ci montrent en général que l'aversion absolue décroît avec la richesse et que l'aversion relative est constante.

Les termes d'aversion absolue au risque et d'aversion relative au risque sont liés à la forme de la loterie. L'aversion absolue s'applique dans le cas de loteries additives

⁵ La fraction de richesse qu'un individu est prêt à perdre pour éviter une situation à risque dépend de deux éléments : l'ampleur du risque (mesurée par l'écart-type de la loterie) et un élément "psychologique" reflétant la nature de la fonction d'utilité (mesurée par le degré d'aversion relative au risque : Ar).

exprimées en unités monétaires. L'aversion relative s'applique dans le cas de loteries multiplicatives exprimées en pourcentage ou en fraction. Dans l'application au cas des accidents nucléaires, la méthode sera appliquée à la fraction de richesse perdue, et utilisera donc le coefficient d'aversion relative au risque (Ar). Pour une fonction d'utilité $U(W)$ donnée, ce coefficient est obtenu par la formule suivante :

$$Ar = - W \cdot [U''(W) / U'(W)]$$

Il existe plusieurs types de fonction d'utilité qui donnent une aversion absolue au risque décroissante et une aversion relative au risque constante. Celle retenue dans l'application au cas des accidents nucléaires est une fonction puissance du type :

$$U(W) = [(1-\beta) / \beta] \cdot W^\beta, \text{ avec } \beta < 1$$

Le coefficient d'aversion relative Ar est alors égal à $(1 - \beta)$

si l'individu est neutre au risque, l'utilité de la richesse est égale à celle-ci, soit :

$$U(W) = W.$$

Calcul du coefficient multiplicateur

Pour estimer l'impact de la prise en compte de l'aversion au risque sur l'évaluation d'une situation à risque, reprenons l'évaluation de la loterie précédente. On a vu qu'il était possible de déterminer la fraction de richesse M qu'un individu accepterait de perdre pour éviter la loterie. Cette fraction de richesse est différente suivant que l'individu est neutre au risque (M_N) ou a de l'aversion au risque (M_A). Le ratio des deux fractions de richesses permet alors d'estimer un coefficient multiplicateur pouvant être appliqué à l'évaluation d'une loterie pour tenir compte de l'aversion au risque.

En utilisant la fonction d'utilité précédemment retenue, les valeurs suivantes sont obtenues :

- si l'individu est neutre au risque : $M_N = p \cdot X$
- si l'individu a de l'aversion au risque : $M_A = 1 - [(1 - p) + (1 - X)^\beta]^{1-\beta}$

Le ratio $K = M_A / M_N$ correspond alors au rapport entre le consentement à payer pour éviter la loterie avec aversion au risque et le consentement à payer pour éviter cette loterie sans aversion au risque.

1.2.5.2. Application à l'évaluation du coût de l'accident nucléaire

Pour appliquer cette méthode à l'évaluation du coût de l'accident nucléaire, il est d'abord nécessaire de décrire l'accident en terme de loterie, c'est-à-dire de décrire les différents états du monde auxquels les individus sont confrontés.

Le scénario retenu pour la modélisation est celui de l'accident ST21 donnant lieu à un relâchement de l'ordre de 1 % du cœur, associé à une probabilité d'accident avec relâchement de $1.9 \cdot 10^{-6}$ / réacteur.année (cette probabilité est celle retenue dans l'implémentation française de ExternE, la méthodologie générale retenant une probabilité de $0,95 \cdot 10^{-5}$ / réacteur.année) [11].

Une distinction a été réalisée entre les individus habitant dans un rayon de 100 km autour de la centrale nucléaire (zone locale, comprenant $2 \cdot 10^6$ individus) et ceux situés hors de cette zone (zone régionale, comprenant $54 \cdot 10^6$ individus). Dans la zone locale, une distinction supplémentaire a été faite entre les personnes évacuées ou relogées et les personnes non évacuées.

Les conséquences, évaluées en termes de coût individuel sont réparties en 4 catégories :

- coûts des effets sanitaires : effet mortel (2,6 MEuros/effet), et effet non mortel (0,25 MEuro/effet) ;
- coûts associés aux contre-mesures agricoles (1,65 MEuros/personne affectée en zone locale ; 1,07 MEuros/personne affectée en zone régionale) ;
- coûts d'évacuation et de relogement ($1 \cdot 10^{-2}$ MEuros/personne affectée; uniquement en zone locale) ;
- coûts indirects (2.44 MEuros/personne affectée ; uniquement en zone locale).

Pour évaluer ces coûts en termes de fraction de richesse perdue, une hypothèse a été faite concernant la richesse individuelle initiale des individus. Celle-ci a été estimée en prenant en compte deux composantes :

- la valeur monétaire de la vie humaine (telle qu'évaluée dans le projet ExternE) : 2,6 Meuros ;
- la richesse financière individuelle moyenne (basée sur les données françaises concernant le patrimoine des ménages) : 0,007 MEuros.

Pour chaque sous-groupe, une estimation du pourcentage de richesse perdue (X) a été réalisée en fonction des coûts supportés par les individus, donnant lieu à la loterie présentée en Figure 4. Les probabilités correspondent à celles d'avoir ou non un effet sanitaire, mortel ou non mortel, évaluées en fonction du nombre de cas estimés rapportés aux populations de chaque sous-groupe.

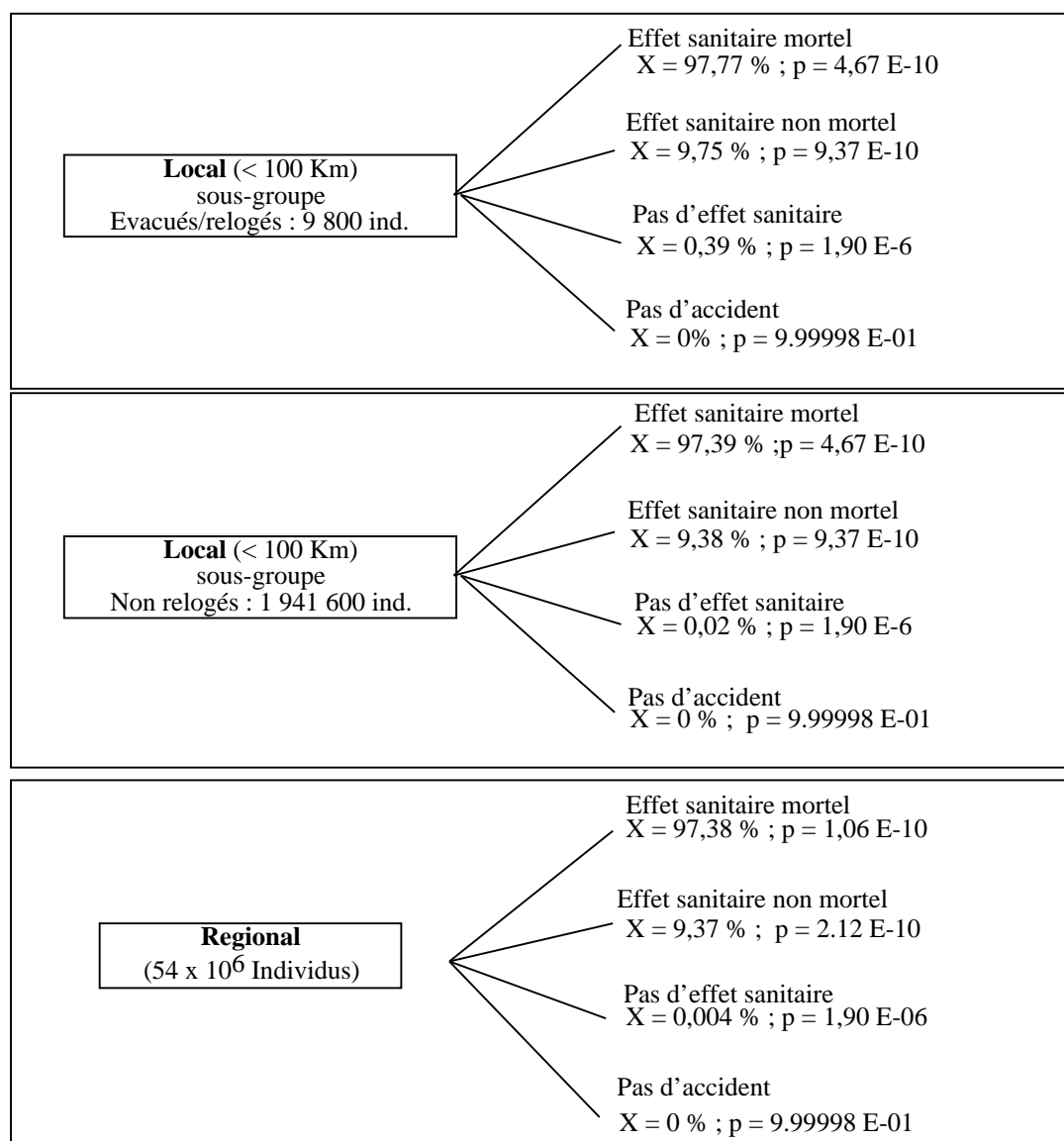


Figure 4. La loterie associée à un accident nucléaire

Pour l'application numérique, la fonction d'utilité utilisée est celle présentée précédemment, en retenant un coefficient d'aversion relative au risque égal à 2. La sélection de ce coefficient a été faite sur la base d'études empiriques réalisées principalement dans le domaine financier, et révélant le plus souvent des valeurs allant

de 0,5 à 2,5. Etant donné les composantes de l'accident nucléaire caractérisées par de fortes pertes associées à une probabilité très faible, l'adoption d'un coefficient supérieur à 2,5 conduirait à des valeurs absurdes de consentement à payer pour éviter l'accident, car proches de la richesse totale des individus.

La fonction d'utilité retenue est donc : $U(W) = -2 W^{-1}$

Pour le calcul du coefficient multiplicateur, les consentements à payer pour éviter l'accident sans aversion au risque (M_N) et avec aversion au risque (M_A) ont été estimés pour chaque sous-groupe, puis pondérés par le nombre d'individus de chaque sous-groupe. La valeur du ratio entre les valeurs pondérées des consentements à payer sans et avec aversion est de 19,7.

Il a donc été suggéré de multiplier par 20 le coût externe de l'accident nucléaire pour tenir compte de l'aversion au risque [16] .

Analyse de sensibilité par rapport au scénario et au coefficient d'aversion au risque

Si l'on reprend les 4 scénarios d'accident présentés précédemment, et en faisant varier le coefficient d'aversion au risque entre 0,5 et 3, le coefficient multiplicateur obtenu varie entre 1,3 et 400, comme le montre le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8. Sensibilité du coefficient multiplicateur à appliquer au coût externe de l'accident aux scénarios d'accident et au coefficient d'aversion relative au risque

Scénarios	Coefficient multiplicateur à appliquer au coût externe de l'accident pour tenir compte de l'aversion au risque				
	<i>Coefficient d'aversion relative au risque (Ar)</i>				
	0,5	1,2	2	2,5	3
ST2	1,38	3,38	20,78	86,68	404,96
ST21	1,36	3,27	19,76	81,69	378,46
ST22	1,37	3,33	20,20	83,50	386,48
ST23	1,31	2,93	16,90	69,33	320,21

2. LES EVALUATIONS DU PROJET EXTERNE

Cette section a pour but de présenter une synthèse des principales hypothèses retenues dans les différents rapports publiés par le CEPN dans le cadre du projet ExternE et de l'évaluation du coût externe de l'accident. Certains éléments ont été présentés pour illustrer la méthodologie générale d'évaluation du coût externe d'un accident nucléaire dans la section 1.

2.1. Méthodologie générale ExternE

La méthodologie générale retenue pour le cycle électronucléaire, comprenant l'évaluation du coût externe de l'accident, est présentée dans le rapport CEPN R-234 [9]. Nous présentons ici les principales hypothèses retenues pour le calcul du coût de l'accident.

Scénarios de référence

La probabilité de fusion du cœur retenue est de $5 \cdot 10^{-5}$ / réacteur.an, correspondant aux valeurs des études probabilistes de sûreté de 1990 pour un réacteur de 900 MWe. Les calculs ont été effectués pour les 4 scénarios de rejets ST2, ST21, ST22, et ST23 présentés précédemment dans la section 1.1.2. Pour l'inventaire radiologique du cœur, la référence est celle d'un réacteur de 1200 MWe, seule donnée disponible dans la littérature au moment de l'étude.

Les scénarios ST2, ST21 et ST22 correspondent à des rejets provoqués par une rupture majeure de l'enceinte de confinement, dont la probabilité conditionnelle (sachant fusion du cœur) est estimée à 19 % (valeur basée sur des études américaines, faute d'informations plus détaillées au moment de l'étude). Le scénario ST23 correspond à des rejets sans rupture de l'enceinte de confinement. Sa probabilité conditionnelle est estimée à 81 %. Le Tableau 9 résume les principales caractéristiques des scénarios retenus.

Tableau 9. Les scénarios retenus dans la méthodologie générale ExternE

Scénarios *	Fraction rejetée de gaz rares	Fraction rejetée des éléments volatiles (I, Cs, Te)	Probabilité conditionnelle (sachant fusion du cœur)
ST2	100 %	10 %	19 %
ST21	10 %	1 %	19 %
ST22	1 %	0,1 %	19 %
ST23	0,1 %	0,01 %	81 %

* Les trois premiers scénarios sont considérés comme étant exclusifs

Conséquences économiques et sanitaires

Les données concernant l'évacuation, le relogement et les restrictions agricoles proviennent du calcul de COSYMA. Les calculs ont été effectués pour une centrale hypothétique située au centre de l'Allemagne (seules données disponibles au moment de l'étude pour ce logiciel). Les données concernant le nombre d'effets sanitaires proviennent de l'application de la relation dose-effet retenue dans la méthodologie générale de ExternE. Le Tableau 4 et le Tableau 5 présentés précédemment donnent l'évaluation des impacts sanitaires et des coûts associés à ces scénarios.

Les calculs économiques concernant l'évacuation, le relogement et les restrictions agricoles ont été réalisés sur la base des valeurs unitaires de coût présentées dans le Tableau 10 ci-après. Les pertes de revenus (dues à l'évacuation ou au relogement) ont été estimées sur 2 ans, les pertes de capital (dues au relogement ou aux restrictions agricoles) ont été considérées sur la deuxième et troisième années. Ces coûts ont été actualisés à un taux de 7 %.

Le coût des effets sanitaires a été évalué à partir des valeurs monétaires de ExternE en 1995 : 0,015 MEuros par maladie précoce ; 0,25 MEuros par cancer non mortel ; 2,6 MEuros par effet mortel (mort précoce, cancer mortel, effet héréditaire sévère). Aucune actualisation n'a été appliquée pour ces coûts.

Tableau 10. Paramètres économiques par défaut utilisés dans COSYMA pour le calcul du coût externe de l'accident dans ExterneE

	Coût unitaire par défaut (valeurs en Euro 1995)
Evacuation - relogement	
<u>Transport (privé, public)</u>	
• Evacuation	5 Euro/pers.
• Relogement	25 Euro/pers.
<u>Logement</u>	
• Evacuation	15 Euro/pers.jour
• Relogement	1 150 Euro/pers.an
<u>Perte de revenu</u>	15 150 Euro/pers.an
<u>Perte de service du capital</u>	
• Non-résidentiel	8 650 Euro/pers.
• Résidentiel	40 650 Euro/pers.
• Terres	10 000 000 Euro/km ²
• Biens durable	17 500 Euro/pers.
<u>Durée de relogement</u>	2 ans
<u>Taux d'intérêt</u>	5 %
<u>Taux d'actualisation</u>	7 %
<u>Taux de dépréciation</u>	
• Non résidentiel	16 %
• Résidentiel	2 %
• Biens durables	16 %
Restrictions agricoles	
<u>Perte de production agricole</u> (1ère valeur : production brute utilisée pour la 1ère année / 2ème valeur : valeur PNB utilisée les 2 années suivantes)	
• Récoltes	0.17 / 0.09 Euro/kg.an
• Bétail	1.32 / 0.71 Euro/kg.an
• Lait	0.33 / 0.18 Euro/kg.an
<u>Perte de service du capital agricole</u> (1ère valeur : non-résidentiel / 2ème valeur : résidentiel)	
• Récoltes	0.16 / 0.23 Euro/kg
• Bétail	1.25 / 1.81 Euro/kg
• Lait	0.31 / 0.45 Euro/kg
<u>Coût des déchets*</u>	
• Récoltes	0 Euro/kg
• Bétail	0 Euro/kg
• Lait	0.03 Euro/kg

* *L'hypothèse retenue dans cette évaluation est que les récoltes et le bétail sont stockés sur place, ne générant pas de coût additionnel. Le lait est, par contre, transporté pour être détruit. Le coût indiqué est celui du transport.*

Le détail des coûts estimés pour le scénario ST2 est donné dans le Tableau 11.

Tableau 11. Coût de l'accident ST2

			Surface	Population	Coût individuel (Euro ₁₉₉₅)	Coût total (MEuro ₁₉₉₅)
Local	Evacuation		153	44 000	1 648,9	72,56
0 - 100 km		Transport			9,6	0,4
		Logement			430,9	19,0
		Perte de revenu			1 208,4	53,2
	Relogement		202	58 419	24 694,7	1 442,6
		Transport			44,0	2,6
		Logement			1 123,1	65,6
		Perte de revenu			14 794,9	864,3
		Perte de capital			8 732,7	510,1
	Restrictions agricoles		1440-2800			824,0
		Perte de production				180,4
		Perte de capital				641,3
		Coûts des déchets				2,3
	Effets sanitaires			10 810,2		11 044,1
		Morbidité (CT)		138,0	0,015 E+06	2,1
		Morbidité (MT)		7 108,8	0,25 E+06	1 777,2
		Mortalité		3 563,4	2,60 E+06	9 264,8
Régional	Restrictions agricoles					26 809,6
100 - 3 000 km		Perte de production				8 254,3
		Perte de capital				18 434,1
		Coûts des déchets				121,2
	Effets sanitaires			41 670		43 059,0
		Morbidité (MT)		27 780	0,25 E+06	6 945,0
		Mortalité		13 890	2,60 E+06	36 114,0
Coût total						83 252

Calcul du coût externe de l'accident

Le coût externe de l'accident a été évalué pour les 4 scénarios en se basant sur une production annuelle de 7.6 TWh/réacteur.an (voir Tableau 12). Il est compris entre 0,104 à 0,0023 mEuro/kWh.

Dans le même rapport, le coût externe du cycle électronucléaire est évalué à 2,48 mEuro/kWh hors coût de l'accident et avec un taux d'actualisation nul. Il est évalué à $9,52 \cdot 10^{-2}$ mEuros/kWh hors coût de l'accident, avec un taux d'actualisation de 3 %.

Tableau 12. Coût externe de l'accident dans la méthodologie générale ExternE

Terme source	Probabilité fusion (réacteur.an) ⁻¹	Probabilité conditionnelle	Coût total (MEuro)	Coût x probabilité (MEuro/réact.an)	Coût externe accident (mEuro ₁₉₉₅ /kWh)
METHODOLOGIE EXTERNE (R234, [9])					<i>(7.6 TWh/réact.an)</i>
ST2	$5 \cdot 10^{-5}$	0,19	83 252	0,790	0,104
ST21	$5 \cdot 10^{-5}$	0,19	17 093	0,162	0,021
ST22	$5 \cdot 10^{-5}$	0,19	3 339	0,032	0,0042
ST23	$5 \cdot 10^{-5}$	0,81	431	0,017	0,0023

2.2. Implémentation française

L'implémentation française de la méthodologie générale ExternE est présentée dans le rapport CEPN R-238 [17].

Les principales modifications pour l'évaluation du coût externe de l'accident par rapport aux hypothèses de la méthodologie générale sont les suivantes :

- la probabilité de fusion du cœur considérée est celle d'un réacteur de 1300 MWe, à savoir : $1 \cdot 10^{-5}$ / réacteur.an (au lieu de $5 \cdot 10^{-5}$ dans la méthodologie générale) ;
- le scénario de référence retenu est le scénario ST21 de la méthodologie générale (rejet d'environ 1% du cœur - proche du scénario de référence utilisé en France en 1995 pour les analyses de sûreté -, inventaire radiologique d'un 1200 MWe, probabilité conditionnelle de 0,19) ;

- le calcul des effets sanitaires et du coût de l'accident sont similaires à ceux de la méthodologie générale. Le coût de l'accident s'élève à 17 093 Meuro ;
- pour le calcul du coût externe de l'accident, la production d'électricité a été estimée à 7 TWh/réacteur.an (au lieu de 7,6 TWh/réacteur.an dans la méthodologie générale). Le coût externe de l'accident s'élève alors à 0,0046 mEuro/kWh (voir Tableau 13).

Tableau 13. Coût externe de l'accident dans l'implémentation française

Terme source	Probabilité fusion (réacteur.an) ⁻¹	Probabilité conditionnelle	Coût total (MEuro)	Coût x probabilité (MEuro/réact.an)	Coût externe accident (mEuro ₁₉₉₅ /kWh)
IMPLEMENTATION FRANCE (R238, [17])					<i>(7 TWh/réact.an)</i>
ST21	1.10 ⁻⁵	0,19	17 093	0,032	0,0046

Dans ce rapport, le coût total du cycle électronucléaire est de 2,52 mEuro/kWh, hors actualisation et hors coût des accidents.

2.3. Développements complémentaires

Les développements complémentaires réalisés dans le cadre de ExternE sont présentés dans le rapport CEPN R-260 [11]. Ces développements ont principalement porté sur l'évaluation du coût indirect des accidents et sur la prise en compte de l'aversion au risque.

2.3.1. Prise en compte des coûts indirects

La méthodologie d'évaluation des coûts indirects est celle présentée précédemment dans la section 1.2.4. Les résultats obtenus dans le cas d'un accident en Champagne-Ardenne montrent que le coût local d'un accident est augmenté de près de 25 % si on prend en compte les coûts indirects sur l'économie générés par les pertes de valeur ajoutée. Ce résultat a été appliqué au scénario de référence ST21, en considérant une probabilité de fusion du cœur de 1.10⁻⁵ et une probabilité conditionnelle pour le scénario ST21 de 19%.

Le coût total initial de l'accident, s'élève à 17 093 MEuros, dont 1 954 MEuros pour le coût supporté dans la zone locale (voir Tableau 5). Une augmentation de 25 % du coût a été appliquée sur la composante locale du coût total, soit une augmentation de 488 MEuros. Le coût total de l'accident s'élève ainsi à 17 582 MEuros.

Pour le calcul du coût externe, la production d'électricité retenue a été évaluée à 7,6 TWh/reacteur.an. Le coût externe de l'accident s'élève alors à 0,0044 mEuro/kWh (voir Tableau 14). Il apparaît ainsi que la prise en compte des coûts indirects augmente d'environ 4% le coût externe de l'accident (0,0044 mEuro/kWh avec coûts indirects et 0,0042 mEuro/kWh hors prise en compte des coûts indirects).

Tableau 14. Coût externe de l'accident avec prise en compte des coûts indirects

Terme source	Probabilité fusion (réacteur.an) ⁻¹	Probabilité conditionnelle	Coût total (MEuro)	Coût x probabilité (MEuro/réact.an)	Coût externe accident (mEuro ₁₉₉₅ /kWh)
PRISE EN COMPTE DES COÛTS INDIRECTS (R260, [11])					<i>(7.6 TWh/réact.an)</i>
ST21	1.10 ⁻⁵	0,19	Hors coûts indirects 17 093	0,0324	0,0042
ST21	1.10 ⁻⁵	0,19	Avec coûts indirects 17 582	0,0334	0,0044

2.3.2. Prise en compte de l'aversion au risque

Les développements complémentaires réalisés pour la prise en compte de l'aversion au risque sont ceux présentés dans la section 1.2.5. Il est ainsi suggéré d'appliquer un coefficient multiplicateur au coût externe de l'accident pour intégrer la dimension d'aversion au risque, ce coefficient ayant été estimé en se basant sur la théorie de l'utilité espérée, et étant égal au ratio entre le consentement à payer pour éviter l'accident hors aversion au risque et le consentement à payer pour éviter l'accident étant donnée une aversion au risque relative égale à 2.

Deux publications ont été réalisées : le rapport CEPN R-260 [11] et une publication dans le Journal of Environmental Management [16].

Dans le rapport 260, les hypothèses sont les suivantes (voir Tableau 15) :

- probabilité de fusion du cœur : $1 \cdot 10^{-5}$ par année.reacteur
- scénario de référence : ST21 - probabilité conditionnelle : 0,19

- coût total de l'accident : 17 582 MEuros, estimé en tenant compte des coûts indirects
- coût externe de l'accident hors aversion : 0,0044 mEuros/kWh, en se basant sur une production d'électricité de 7,6 TWh/an/réacteur
- coefficient multiplicateur pour tenir compte de l'aversion au risque : 19,6
- coût externe de l'accident avec aversion : 0,087 mEuro/kWh

Le coût externe total du cycle électronucléaire hors accident, évalué dans le cas français [17], est de 2,52 mEuros/kWh avec un taux d'actualisation nul. Le coût externe de l'accident hors aversion (0,0044 mEuros/kWh) représente 0,2 % de ce coût. En intégrant l'aversion au risque, le coût de l'accident (0,087 mEuros/kWh) représente 3,5 % du coût externe total du cycle électronucléaire (hors accident et avec un taux d'actualisation nul). Avec un taux d'actualisation à 3 %, le coût externe total du cycle électronucléaire hors accident est de $9 \cdot 10^{-2}$ mEuros/kWh. Le coût de l'accident avec aversion est alors du même ordre de grandeur que le coût externe total du cycle électronucléaire (hors accident et avec un taux d'actualisation de 3 %).

Dans la publication au Journal of Environmental Management (JEM), l'hypothèse de probabilité d'accident a été simplifiée, considérée comme égale au total à $1 \cdot 10^{-6}$ pour le scénario ST21 (au lieu de $1,9 \cdot 10^{-6}$). Au final, les principales hypothèses sont les suivantes (voir Tableau 15):

- Probabilité de fusion du cœur : $1 \cdot 10^{-5}$ par année.réacteur
- Scénario de référence : ST21 - probabilité conditionnelle : 0,1
- Coût total de l'accident : 17 582 MEuros, estimé en tenant compte des coûts indirects
- Coût externe de l'accident hors aversion : 0,0023 mEuros/kWh, en se basant sur une production d'électricité de 7,6 TWh/an/réacteur
- Coefficient multiplicateur pour tenir compte de l'aversion au risque : 20
- Coût externe de l'accident avec aversion : 0,046 mEuro/kWh

Le Tableau 15 ci-après synthétise les hypothèses retenues dans les deux publications et les valeurs calculées.

Tableau 15. Coût externe de l'accident avec prise en compte de l'aversion au risque

Terme source	Probabilité fusion (réacteur.an) ⁻¹	Probabilité conditionnelle	Coût total (MEuro)	Coût x probabilité (MEuro/réact.an)	Coût externe accident (mEuro ₁₉₉₅ /kWh)
PRISE EN COMPTE DE L'AVERSION AU RISQUE (R260, [11])					<i>(7.6 TWh/réact.an)</i>
ST21	1.10 ⁻⁵	0,19	17 582	0,0334	0,0044 (sans aversion) 0,087 (avec aversion, x 19,6)
PRISE EN COMPTE DE L'AVERSION AU RISQUE (Publication JEM, [16])					<i>(7.6 TWh/réact.an)</i>
ST21	1.10 ⁻⁵	0,1	17 582	0,0176	0,0023 (sans aversion) 0,046 (avec aversion, x 20)

2.4. Comparaison avec d'autres études

Les études de coût externe des accidents nucléaires publiées depuis 1989 présentent des variations considérables dans les résultats produits. Le Tableau 16, extrait du rapport CEPN- R260, présente les principales études recensées à ce jour [11]. Certaines de ces études sont également présentées dans le rapport de l'Agence pour l'Energie Nucléaire de l'OCDE [12].

Les différences observées dans les résultats proviennent de deux causes principales : la première relève des méthodes utilisées pour estimer les impacts de l'accident (termes sources, probabilités,...) ; la deuxième cause de différence provient de l'intégration ou non de l'aversion au risque (prise en compte de faibles probabilités d'accidents pouvant provoquer des dommages majeurs).

En ce qui concerne les méthodes de détermination des impacts de l'accident, certaines études sont basées directement sur l'évaluation des impacts de Tchernobyl, et la transposition de ces impacts à des centrales spécifiques. Ainsi, par exemple, les études de Hohmeyer sont basées sur l'utilisation de la valeur de la dose collective mondiale de l'accident de Tchernobyl, multipliée par un facteur 7 (étude de 1989) pour prendre en compte la densité de population en Allemagne. L'étude de 1990 majore encore d'un facteur 5 la dose collective. De plus, Hohmeyer utilise la fréquence totale d'endommagement du cœur d'un réacteur, sans tenir compte de la probabilité

conditionnelle d'un rejet majeur suite à endommagement⁶. L'ensemble de ces hypothèses majorantes expliquent les coûts élevés obtenus dans ces études. Les études de Ottinger et Ewers/Rennings sont basées sur la méthodologie utilisée par Hohmeyer. Celle de Ottinger n'applique pas de coefficient multiplicateur aux impacts, mais utilise des valeurs plus élevées pour la valorisation des cancers. L'étude de Ewers / Rennings applique un coefficient multiplicateur plus faible que celui de Hohmeyer, ainsi qu'une plus faible probabilité d'accident. Les autres études mentionnées dans le Tableau 16 utilisent les résultats des études probabilistes de sûreté pour évaluer les probabilités et les conséquences des accidents.

Trois études proposent des valeurs intégrant l'aversion au risque (Pearce et al., Infrac/Prognos, et CEPN), en appliquant des méthodes différentes :

- Pearce et al. intègre l'aversion au risque par le biais d'une fonction "d'aversion au désastre" qui consiste à pondérer la fonction de risque (probabilité x nombre de personnes concernées) par un facteur donné. Deux méthodes sont proposées : prendre le carré du nombre de personnes exposées, ou multiplier l'ensemble par un facteur 300.
- L'étude Infrac/Prognos considère que l'aversion au risque peut être mesurée par la prise en compte de l'écart type des dommages au lieu de leur moyenne.
- L'étude CEPN prend en compte l'aversion au risque par le biais d'une fonction de transformation de l'évaluation des dommages (voir §1.2.5).

⁶

L'évaluation haute des coûts externe d'un accident de type Tchernobyl en Allemagne dans l'étude de Hohmeyer de 1998 était formulée ainsi [12] :

$2,4 \cdot 10^6$ homme-sievert (dose collective de Tchernobyl) x 10 (plus forte densité de population) x 100 000 cancers/ 10^6 homme-sievert (facteur dose-réponse) x $0,75 \cdot 10^6$ DM (coût de chaque cas de cancer) x $5 \cdot 10^4$ accidents/année-réacteur (fréquence d'accident) : $7,5$ TWh (production d'énergie/année-réacteur) = 12,0 pfennig/kWh.

Pour la borne inférieure, Hohmeyer a appliqué un facteur de réduction de 10 aux fréquences d'accident.

Tableau 16. Etudes internationales sur l'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire

Etude	Intervalle du coût externe (mEuro/kWh)	Particularité des résultats
Hohmeyer (1989)	6,0 - 60	Etude basée sur les impacts de Tchernobyl
Hohmeyer (Supplément, 1990)	17,4 - 105	Etude basée sur les impacts de Tchernobyl
Friedrich <i>et al.</i> (1990)	0,04 - 0,35	
Ottinger <i>et al.</i> (1990)	18,4	Etude basée sur les impacts de Tchernobyl
Pearce <i>et al.</i> (1992)	0,00085 - 0,0021 0,25 - 0,625 3,38	Valeur espérée (sans aversion au risque) Approche alternative avec aversion au risque Approche alternative avec aversion au risque
Ewers/Rennings (1992)	21,5	Etude basée sur les impacts de Tchernobyl
Hirschberg / Cazzoli (1994)	0 0008 - 0 031	
Wheeler / Hewison (1994)	0,0014 - 0,0016	
Infras/prognos (1994)	0,006 -1,02 11,4 - 189,6	Valeur espérée (sans aversion au risque) Prise en compte de l'aversion au risque en utilisant l'écart type des dommages, au lieu de la moyenne
ORNL/RFF (1995)	SE : 0,083 SW : 0,0477	SE : Site sud-est ; SW : site sud-ouest Effets non sanitaires >> effets sanitaires Taux d'actualisation : 3 %
ExternE (CEPN, 1995)	0,0014 - 0,0235	Taux d'actualisation : 0 %
Rowe <i>et al.</i> (1995)	0 - 0,08	
Krewitt (1996)	0,0085 0,002	Taux d'actualisation : 0% Taux d'actualisation : 3%
CEPN (1998)	0,046	France - Avec aversion au risque

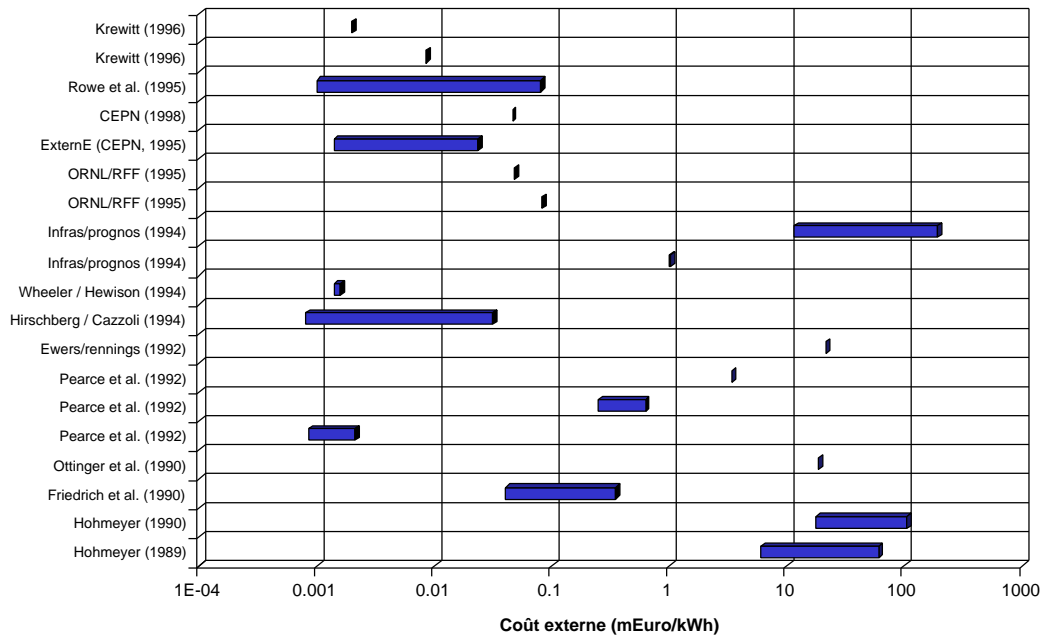


Figure 5. Résultats de différentes études internationales d'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire

3. EXPLORATION D'AUTRES METHODES POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'AVERSION AU RISQUE

3.1. L'approche "non-expected utility"

De façon traditionnelle, l'économiste a recours à la théorie de l'utilité espérée pour évaluer des situations risquées (caractérisées par des loteries). Depuis la fin des années 1970, différentes expérimentations ont mis en évidence un certain nombre de faiblesses du modèle d'utilité espérée et de nouveaux modèles pour évaluer les situations risquées ont été proposés, regroupés sous le terme de modèles de "non-expected utility". Dans cette section, après une présentation des principaux points critiqués dans l'approche de l'utilité espérée, les principes de l'approche en termes de "non-expected utility" sont présentés ainsi que les méthodes disponibles pour révéler les préférences des individus face aux situations risquées. Enfin, les difficultés rencontrées quant à l'application de cette démarche sont soulignées.

3.1.1. La démarche générale

3.1.1.1. *Quelques critiques du modèle d'utilité espérée*

La démonstration de Von Neumann et Morgenstern [18] concernant le modèle de l'utilité espérée étant considérée "irréprochable" par les économistes, la critique du modèle a porté sur les axiomes adoptés pour cette démonstration. Ainsi, une des critiques les plus importantes a été émise par Maurice Allais [19] qui a remis en cause l'axiome d'indépendance entre les loteries. Cet axiome d'indépendance dans l'approche d'utilité espérée s'énonce comme suit :

Si on considère 3 loteries (notées respectivement $L1$, $L2$, $L3$) avec $L1$ préférée à $L2$ préférée à $L3$, alors toute combinaison $\lambda L1 + (1 - \lambda) L2$ est nécessairement préférée à la combinaison $\lambda L1 + (1 - \lambda) L3$, avec $1 > \lambda > 0$.

Le paradoxe d'Allais

Maurice Allais remet en cause l'axiome d'indépendance en mentionnant qu'il ignore les complémentarités éventuelles entre gains (ou pertes) de L1 et L2, d'une part, et de L1 et L3, d'autre part. Or, cet axiome étant remis en cause, il n'est plus possible de déduire la linéarité des probabilités dans l'évaluation des situations risquées.

Plusieurs études expérimentales confirment que les individus ne traitent pas linéairement les probabilités et soulignent que le comportement des individus dépend de la structure de risque à laquelle ils font face. Maurice Allais montre notamment l'existence d'un comportement contradictoire à la théorie de l'espérance d'utilité au voisinage de la certitude (connu sous le terme de "paradoxe d'Allais" - [19]). Ce paradoxe repose sur l'expérience suivante :

- Dans une première étape, il est demandé aux personnes interrogées de choisir parmi les loteries suivantes A1 ou A2 :

A1 : 1 million \$ avec certitude

A2 : 5 millions \$ avec une probabilité de 0,1
 1 million \$ avec une probabilité de 0,89
 0 avec une probabilité de 0,01

- Dans une deuxième étape, l'auteur propose le choix suivant entre B1 et B2 :

B1 : 1 million \$ avec une probabilité de 0,11
 0 avec une probabilité de 0,89

B2 : 5 millions \$ avec une probabilité de 0,1
 0 avec une probabilité de 0,9

Si les individus respectent les axiomes de la théorie de l'utilité espérée, alors si la loterie A1 est préférée à la loterie A2, alors B1 est préférée à B2 (et inversement). Or, dans l'expérience menée par Maurice Allais, la majorité des personnes ont dit préférer la loterie A1 à la loterie A2 et en même temps préférer la loterie B2 à la loterie B1, ce qui est incompatible avec les axiomes de l'utilité espérée.

Le paradoxe de Karmarkar

Une autre catégorie de problèmes est apparue lors de l'estimation des fonctions d'utilité. Karmarkar [20] a montré que la révélation d'une fonction d'utilité par la méthode de l'équivalent certain dépendait des probabilités utilisées. Cette méthode consiste à interroger les individus sur l'équivalent certain de différentes loteries binaires afin de définir analytiquement la fonction d'utilité. La construction de la fonction d'utilité repose sur une équation du type :

$$U(x_3) = p.u(x_1) + (1-p).u(x_2)$$

En fixant x_1 et p , on peut à partir de différentes valeurs de x_2 expliciter les équivalents certains x_3 . Cette méthode d'estimation suppose que les préférences soient linéaires en probabilités, conformément à la théorie de l'utilité espérée. Or, Karmarkar montre qu'un changement dans la valeur de probabilité conduit à un changement dans l'estimation de la fonction, ce qui tend à montrer qu'il existe une déformation des probabilités.

3.1.1.2. Les nouveaux modèles proposés de type "non-expected utility"

Depuis le début des années 1980, des économistes ont cherché à proposer de nouveaux modèles permettant de répondre aux critiques formulées à l'encontre de la théorie de l'utilité espérée. Ces modèles ont été classés en trois catégories [21] :

- les modèles reposant sur une réécriture de la fonction d'utilité pour répondre au problème du renversement des préférences (modèle de Loomes et Sudgen dit modèle de regret) ;
- les modèles séparables ("Prospect theory" de Kahneman et Tversky) qui introduisent principalement deux modifications :
 - les valeurs prises en compte dans les loteries sont les gains ou les pertes et non la richesse finale
 - la valeur de chaque revenu est multipliée par un poids de la décision et non par une probabilité additive

Ces transformations conduisent à remplacer la fonction d'utilité par une fonction de valeur et à introduire une fonction de transformation non linéaire des

probabilités en accordant plus d'importance aux faibles probabilités qu'aux probabilités élevées.

- Les modèles d'utilité espérée généralisée (Machina) et les modèles dichotomiques (Yaari-Allais) :

Ces modèles partent du constat que le modèle d'utilité espérée ne permet pas d'expliquer le fait que les individus peuvent manifester une attitude d'aversion au risque et dans le même temps une attitude de prise du risque. Pour palier ce problème, ces nouveaux modèles introduisent une séparation entre l'évaluation marginale du revenu et l'évaluation de l'attitude par rapport au risque (introduction de deux fonctions différentes).

3.1.2. La révélation des préférences concernant la fonction de transformation des probabilités

L'utilisation des modèles de type "non expected utility" suppose que l'on puisse révéler les fonctions de transformation des probabilités. Dans cette optique, une méthode a été développée il y a quelques années par Bertrand Munier et Mohamed Abdellaoui à l'ENS Cachan. Cette méthode est qualifiée de méthode "du resserrement progressif" ou encore méthode des "jumeaux" [22].

Dans cette méthode, l'individu doit comparer deux changements de situation concernant deux autres agents (notés agents A et B) qui possèdent exactement les mêmes préférences que lui face aux risques. Ces changements de situation consistent, pour chaque agent A et B, en une diminution de la probabilité d'être confronté à une conséquence défavorable (notée X).

On demande alors à l'individu quelle est l'amélioration (celle de l'agent A ou celle de l'agent B) qui, selon lui, apporte la plus grande satisfaction. On fait ensuite varier, pour chaque agent A et B, les probabilités d'être confronté à cette même conséquence défavorable X et on demande à nouveau à l'individu de choisir l'amélioration qu'il préfère. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que l'on trouve une probabilité d'équivalence (notée P^*) pour laquelle les améliorations sont jugées apporter le même niveau de satisfaction.

De façon pratique, l'application de cette méthode sur l'intervalle de probabilités $[0, 1]$ consiste à prendre comme probabilité P^* la valeur 0,5 et à proposer à l'individu les changements de situation suivants :

- Agent A :

Situation initiale : x avec une probabilité de 1
y avec une probabilité de 0

Changement de situation :

x avec une probabilité de 0,5
y avec une probabilité de 0,5

- Agent B :

Situation initiale : x avec une probabilité de 0,5
y avec une probabilité de 0,5

Changement de situation :

x avec une probabilité de 0
y avec une probabilité de 1

En fonction de la réponse à ces changements de situation, la valeur de la probabilité P^* est augmentée ou diminuée. La procédure est reproduite jusqu'à l'obtention d'une probabilité d'équivalence P_1^* pour laquelle les deux changements de situation (celui de l'agent A et celui de l'agent B) sont jugés équivalents.

Lorsque les changements de situation sont jugés équivalents, en notant la fonction de transformation des probabilités, on a :

$$(P^*) - (0) = (1) - (P^*)$$

Par définition, on a : $(0) = 0$ et $(1) = 1$

On obtient alors pour la probabilité d'équivalence : $(P^*) = 0,5$

En appliquant cette méthode sur différents intervalles de probabilités, il est possible de déterminer plusieurs points, à partir desquels, par interpolation linéaire, la fonction de transformation des probabilités est estimée.

3.1.3. Les limites concernant l'utilisation de la méthode

Durant ces dernières années, plusieurs applications du modèle de type "non-expected utility" ont été proposées afin d'évaluer des situations risquées. On peut citer notamment dans le cas de l'exposition au risque radiologique, l'application pour les expositions incidentelles (ou potentielles) dans les installations nucléaires [22] ainsi que le cas des comparaisons d'itinéraires et de modes de transport pour les colis de matières radioactives [23]. Dans ces deux exemples d'application, les combinaisons "probabilités - conséquences" ont été analysées et la méthode des "jumeaux" a été utilisée pour révéler les fonctions de transformation de probabilités. Ces applications ont permis de mettre en évidence le type de questionnement qui peut être proposé aux individus afin de révéler leur fonction de transformation des probabilités.

Il convient cependant de souligner que ces applications font apparaître les limites de cette approche dès lors que l'on souhaite l'appliquer aux situations accidentelles :

- d'une part, parmi les personnes interrogées, diverses préférences apparaissent, certains individus accordant un poids plus important aux faibles probabilités tandis que d'autres accordent plus d'importance aux fortes probabilités ou encore sont indifférents au niveau de probabilité (il n'existe donc pas une fonction uniforme de transformation des probabilités) ;
- d'autre part, la méthode utilisée pour la révélation des préférences concernant la transformation des probabilités (méthode des "jumeaux") est applicable dans la pratique uniquement pour des niveaux de probabilités supérieures à 0,01 voire 0,001. Pour des valeurs plus faibles, le questionnement quant aux changements de situation ne semble plus faire sens pour les personnes interrogées.

Compte tenu de ces limites, l'application de l'approche de type "non-expected utility" aux accidents nucléaires pour lesquels les probabilités d'occurrence sont très faibles et les conséquences potentiellement très importantes ne semble pas réaliste dans la mesure où il n'existe pas actuellement de méthode permettant de révéler les préférences pour ces niveaux de probabilité. Or, la fonction de transformation de probabilités n'étant pas linéaire en probabilité, les extrapolations de résultats obtenus pour des probabilités plus élevées ne sont pas envisageables. Dans ce contexte, on peut rappeler la conclusion d'Anyl Markandya dans le cadre des réflexions sur les développements complémentaires concernant les évaluations des coûts des accidents du projet ExternE :

"L'utilisation du modèle d'espérance d'utilité permet de fournir une correction immédiate et raisonnable au calcul des coûts externes. La méthode non-expected utility devrait permettre de différencier entre les probabilités définies par les experts et celles évaluées par le public. Cependant, la façon dont elles doivent être transformées reste à étudier."[11].

3.2. La prise en compte des risques diversifiables

Dans le cas de l'évaluation du coût externe de l'accident avec aversion au risque, deux types de risques ont été agrégés :

- les conséquences "individuelles" de l'accident : coûts de relogement et évacuation, coûts indirects, effets sanitaires, coûts des contre-mesures agricoles ;
- l'occurrence proprement dite de l'accident qui lui, affecte tout le monde.

Le premier type de risque est considéré comme étant "diversifiable" (en principe, les individus peuvent prendre une assurance pour couvrir ce risque). Le deuxième type de risque (l'accident lui-même) n'est pas diversifiable, c'est-à-dire non assurable. En principe, le coût social du risque devrait être supérieur pour ce type de risque.

Une des conséquences de la prise en compte des risques diversifiables réside dans l'évaluation de l'impact de l'aversion au risque sur le coût externe de l'accident. Pour cela, dans la méthodologie proposée au § 1.2.5, il conviendrait d'identifier dans l'évaluation des conséquences de l'accident, la part qui relève des dommages assurables. Cette part devrait alors être déduite des coûts individuels. Par ailleurs, il conviendrait de supprimer de la richesse initiale des individus, le montant de l'assurance. Les conséquences seraient alors évaluées uniquement sur les dommages non assurables.

Des essais numériques fictifs montrent que la différence entre l'évaluation d'une loterie tenant compte de la part assurable des conséquences avec aversion et de la même loterie sans aversion serait considérablement réduit, par rapport à une situation où tous les risques seraient pris en compte. Ceci peut avoir des conséquences sur l'évaluation du coût externe de l'accident avec aversion ou sans aversion, mais nécessiterait des développements complémentaires.

4. LIMITES DES EVALUATIONS MONETAIRES DU COUT EXTERNE DES ACCIDENTS NUCLEAIRES ET INTERETS DE DEVELOPPEMENTS COMPLEMENTAIRES

L'évaluation du coût externe d'un accident nucléaire comporte indéniablement de nombreuses incertitudes et des dimensions complexes qu'il convient de souligner dans un premier temps, afin de mieux appréhender, dans un deuxième temps, les intérêts et les limites des valeurs monétaires obtenues et les développements complémentaires possibles.

4.1. Les dimensions de complexité dans l'évaluation du coût externe de l'accident

4.1.1. Les dimensions scientifiques

Malgré une amélioration certaine des modèles permettant d'estimer l'impact d'un accident potentiel d'un réacteur nucléaire, des dimensions d'incertitudes sur la modélisation de ces impacts sont inévitables et ont un impact direct sur l'évaluation des conséquences monétaires de l'accident. Ainsi, la détermination du terme source et des probabilités associées à ce terme source sont des facteurs importants qui peuvent considérablement modifier l'évaluation monétaire. Il est à noter que cette incertitude n'est pas seulement due aux modélisations d'accidents potentiels : même après un accident, il est difficile de bien connaître l'inventaire radiologique des rejets de cet accident.

Par ailleurs, les modèles de transfert de la radioactivité dans l'environnement comportent des limites, avec notamment une grande difficulté à modéliser les phénomènes de remise en suspension de la contamination après un premier dépôt. Les circuits de transfert sur le long terme de la contamination sont difficiles à modéliser avec précision, dans la mesure où ils vont dépendre à la fois des contre-mesures appliquées et des activités humaines dans les zones concernées (par exemple, dans les zones contaminées de Tchernobyl, l'utilisation dans les cheminées du bois des forêts locales par les habitants favorise un transfert de la contamination dans les villages via les cendres qui sont ensuite dispersées dans les jardins).

4.1.2. Les dimensions techniques

Les modélisations d'impact des accidents intègrent généralement la mise en place de contre-mesures qui ont pour objectif de diminuer l'impact sanitaire de l'accident. Dans la pratique, il est à prévoir que ces contre-mesures seront généralement difficiles à mettre en œuvre dans les proportions prévues. Ainsi, les mesures de confinement des populations, d'évacuation ou de distribution d'iode sont sujettes à de grandes variations en fonction de la réaction des populations. Par ailleurs, l'arrêt des activités industrielles dans des zones nécessitant une évacuation immédiate peut se révéler impossible à mettre en œuvre sans compromettre la sûreté de cet arrêt (notamment pour des usines chimiques ou de métallurgie qui nécessitent plusieurs jours pour que le processus de production puisse être interrompu). Citons également les incertitudes liées à l'efficacité de la décontamination des sols et aux conséquences de la gestion des déchets générés par ces décontaminations (notamment par la récupération de volumes importants de terres contaminées).

Enfin, la détermination des zones de relogement et des autres types de contre-mesures (notamment agricoles) est indissociable d'une interaction avec les conséquences économiques de ces contre-mesures. Il est difficile de prévoir à l'avance la gestion sur le long terme de ces contre-mesures. Leur efficacité est donc incertaine.

4.1.3. Les dimensions sanitaires

Les impacts sanitaires constituent la majeure partie des évaluations du coût externe des accidents. Les relations dose-effet retenues par la communauté internationale sont basées essentiellement sur les études épidémiologiques des impacts des bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki, dont les conséquences ne sont pas nécessairement comparables à celles d'un accident nucléaire. Ainsi, par exemple, ces études ne traduisent pas l'impact potentiel de l'exposition chronique à la radioactivité. Cette situation est observée dans les territoires contaminés de Tchernobyl, où la population ingère quotidiennement de la contamination et présente des phénomènes de dégradation de la santé dont la part liée à la contamination chronique est difficilement estimable pour l'instant, sur la base des études disponibles.

Par ailleurs, il existe encore des incertitudes sur les effets aux faibles doses. Ainsi, par exemple, l'accident de Tchernobyl a donné lieu à court terme à un excès non prévu de cancers de la thyroïde.

4.1.4. Les dimensions environnementales

L'impact sur l'environnement et les conséquences écologiques d'un accident nucléaire sont également difficilement modélisables, voire quantifiables d'un point de vue monétaire et économique. Comme nous le disions précédemment, les activités humaines peuvent induire une remise en circulation de la contamination dans l'environnement que l'on ne peut pas prévoir à l'avance. Par ailleurs, c'est la qualité même de l'environnement qui est détériorée pour de nombreuses années, une qualité dont la valeur ne peut pas être chiffrée directement d'un point de vue du coût de l'accident.

4.1.5. Les dimensions sociales

Une dimension importante de complexité dans l'évaluation des conséquences d'un accident nucléaire est celle relative aux impacts sur la vie sociale. L'expérience de Tchernobyl, où de nombreux territoires ont été contaminés, montre que la vie sociale locale dans ces territoires est affectée durablement par la présence de la contamination qui nécessite une complète réorientation de la vie professionnelle, des activités économiques et sociales [24]. Les habitants se voient obligés de profondément modifier leur comportement vis-à-vis de leur environnement proche pour, par exemple, éviter les zones fortement contaminées, réduire leur consommation de produits naturels récoltés dans les forêts ou adapter les zones de culture et de pâturage aux zones moins contaminées.

Un accident nucléaire peut également avoir pour conséquence une détérioration de la confiance sociale, en particulier lorsque la gestion de la situation post-accidentelle donne lieu à des débats d'experts ou des décisions contradictoires, sans implication des populations.

Ce qui apparaît aussi est qu'un "retour à la normalité" n'est pas possible, en raison de l'impossibilité d'effacer toute trace de l'accident. La gestion post-accidentelle doit ainsi être centrée sur une gestion du risque résiduel, en tenant compte du fait que le rapport

au risque et à son acceptabilité n'est pas définissable dans sa globalité, mais spécifique à chaque situation, voire à chaque individu. Il est en conséquence impossible de définir *a priori* quelle sera l'ampleur des contre-mesures ou des mesures de protection qui seront nécessaires pour gérer la situation sur le long terme.

4.1.6. Les dimensions économiques

La présence de contamination dans l'environnement a pour conséquence de fortement perturber la vie économique locale et nationale sur le long terme.

En particulier, les productions agricoles locales trouvent difficilement des débouchés vers les autres régions, que ce soit en raison de leur niveau de radioactivité qui ne satisfait pas les normes nationales ou internationales, soit par une perte de confiance de la société dans les produits provenant des régions contaminées (même si les produits répondent aux normes). Par ailleurs, l'obtention de produits moins ou non contaminés ne peut se faire que par une augmentation sensible des coûts de production, qui se répercutent sur le coût des produits et, par conséquent, augmentent les difficultés pour pouvoir les vendre.

De façon plus globale, la "perte d'attrait" pour les régions affectées par l'accident se traduit par une diminution des investissements économiques dans la région, une baisse du tourisme et, par voie de conséquence, une diminution des possibilités d'emploi.

Au niveau national, la gestion des contre-mesures est à envisager sur le long terme, par un processus de décision itératif entre le choix de contre-mesures et leur conséquences économiques, sociales, environnementales,... Il est impossible de déterminer *a priori* quand les contre-mesures s'arrêteront, et par conséquent, de prévoir sur le long terme l'étendue du coût économique des contre-mesures.

Les répercussions sur le long terme au niveau national des perturbations économiques locales sont également difficiles à prévoir et à modéliser.

4.2. Les limites de l'évaluation du coût externe de l'accident nucléaire

L'évaluation actuelle du coût externe de l'accident nucléaire donne un ordre de grandeur de ce coût pouvant être mis en perspective avec le coût externe total de l'ensemble de la filière électronucléaire. Il importe cependant de souligner un certain nombre de limites associées à cette évaluation qui sont dues soit aux modèles et hypothèses utilisés, soit aux limites intrinsèques de l'évaluation économique.

Les limites associées aux modèles et hypothèses retenues

- Les scénarios accidentels pris en compte dans ExternE sont limités à ceux qui étaient considérés comme représentatifs dans les études de sûreté du début des années 1990. Les études de sûreté plus récentes pourraient apporter des modifications quant à la probabilité d'accident, et à la probabilité de fusion du cœur sachant accident, avec pour conséquence, si ces probabilités étaient revues à la baisse, de réduire le coût externe de l'accident.
- L'évaluation des conséquences de l'accident est basée sur une modélisation simplifiée et *a priori* des ces conséquences, établie par rapport à un plan de gestion de crise. L'exemple de Tchernobyl montre que les conséquences d'un accident réel comportent des dimensions non prises en compte dans une modélisation simplifiée.
- Dans les études ExternE, les calculs ont été réalisés pour un rejet localisé en Allemagne. Ils ne tiennent ainsi pas compte des spécificités des sites nucléaires français.
- Le calcul du coût des conséquences sanitaires et économiques ainsi que des contre-mesures agricoles a été réalisé sur une période succincte de l'ordre de 2 à 3 ans, alors que les perturbations de la vie économique et sociale sont plus étalées dans le temps.
- Les paramètres économiques utilisés en référence proviennent des données du début des années 1990, et nécessiteraient une réactualisation à partir des nouvelles données économiques (mise à jour des indicateurs macro-économiques, de la valeur de la vie humaine, de la valeur des biens environnementaux,...).

- Les seules contre-mesures chiffrées concernent le domaine agricole. Les coûts associés aux techniques de décontamination ou à des mesures agricoles plus poussées ne sont pas pris en compte.
- L'évaluation économique se situe à un niveau macro-économique et concerne principalement des coûts directs. Bien qu'une méthodologie ait été développée pour obtenir un ordre de grandeur des coûts indirects, elle mériterait d'être affinée et appliquée à des situations spécifiques.
- Il conviendrait de mieux identifier quel type d'agent économique supporte quel type de coût. En effet, l'évaluation du coût de l'accident ne prend pas en compte les systèmes d'assurance (privés et publics) et n'identifie pas la part du coût pour l'entreprise, pour l'Etat ou pour les particuliers.
- La prise en compte de l'aversion au risque a été réalisée pour un scénario spécifique, et sans analyse de sensibilité aux différents paramètres.

Les limites intrinsèques de l'évaluation économique

- La dimension probabiliste de l'accident nucléaire (événement rare) fait que l'évaluation en termes d'espérance mathématique est non pertinente ou limitée.
- Il est pratiquement impossible de faire rentrer dans un modèle économique l'ensemble des dimensions de complexité évoquées ci-dessus, et en particulier, les dimensions d'incertitudes liées à l'évaluation de l'impact sanitaire et environnemental de l'accident, la mesure de la perte de qualité de vie (destruction du patrimoine économique, social, culturel), et les impacts sociaux.

4.3. Les évaluations complémentaires possibles pour le coût externe de l'accident nucléaire

Les limites évoquées ci-dessus ne sont pas toutes incontournables. Il importe cependant de s'interroger sur les avantages liés à une amélioration des calculs du coût de l'accident. Tout dépend en fait de l'optique dans laquelle on se situe pour l'utilisation de ces calculs :

- Dans une optique d'évaluation du coût externe de l'accident, l'intérêt d'une réévaluation tenant compte, notamment, de la spécificité des sites français, des données économiques récentes et d'une meilleure estimation des contre-mesures pouvant être mises en place, permettrait de renforcer la robustesse de l'évaluation précédemment faite dans le cadre de ExternE. De notre point de vue, une telle réévaluation ne modifierait pas de façon substantielle l'ordre de grandeur du coût de l'accident par rapport au coût externe de la filière nucléaire, mais aurait l'avantage de s'appuyer sur des données reconnues actuellement.

- Dans une optique d'évaluation *a priori* de l'impact potentiel économique et social d'un accident nucléaire, l'intérêt d'une réévaluation et, en particulier, d'une meilleure adaptation de cette évaluation aux conditions économiques actuelles et aux spécificités des sites français, réside dans un meilleur ancrage avec la réalité, permettant de mieux appréhender et anticiper les conséquences potentielles d'un accident. Une telle réévaluation permettrait, entre autres, de mener une réflexion de fond sur les systèmes d'assurance disponibles ou envisageables ainsi que sur les conséquences non directement monétarisables de l'accident.

D'une façon générale, le Tableau 17 présente les analyses déjà réalisées pour l'évaluation du coût de l'accident, les développements complémentaires qui pourraient être effectués, ainsi que les optiques dans lesquelles ces développements présentent un intérêt (optique du renforcement de la robustesse de l'évaluation du coût externe ou de l'amélioration de la préparation à la gestion post-accidentelle).

Tableau 17. Développements complémentaires possibles pour l'évaluation du coût de l'accident nucléaire

Analyse déjà réalisée	Développements possibles	Domaine d'intérêt des développements
Scénarios accidentels pris en compte limités à ceux considérés représentatifs dans les études de sûreté du début des années 1990	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de nouveaux termes sources représentant différents degrés de gravité - Prise en compte de probabilités d'occurrence pour les divers termes sources - Prise en compte des probabilités conditionnelles pour les risques de relâchements dans l'environnement (voir données disponibles actuellement dans les études de sûreté) 	Robustesse coût externe
Calcul réalisé pour un rejet localisé en Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation des conséquences en tenant compte des spécificités de chacun des sites nucléaires français 	Préparation gestion post-accidentelle
Analyse économique succincte limitée aux premières années, basées sur les données disponibles au début des années 1990 dans le logiciel COSYMA	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse plus détaillée envisageable sur la base des nouveaux codes de calcul (type RODOS) et des nouvelles méthodes d'évaluation économique concernant les contre-mesures (voir document AEN) - Réévaluation à partir des nouvelles données économiques (mise à jour des indicateurs macro-économiques, des valeurs de la vie humaine, des biens environnementaux...) 	Robustesse coût externe Préparation gestion post-accidentelle
Evaluation économique du coût social global de l'accident pour les conséquences sanitaires et environnementales et prise en compte d'une analyse des coûts indirects sur la base des matrices input-output	<ul style="list-style-type: none"> - Décomposition des coûts associés à l'accident en fonction des "agents qui supportent ces coûts" - Analyse des coûts supportés ou éligibles dans les systèmes d'assurance - Evaluation des coûts induits pour l'entreprise - Evaluation des conséquences induites sur l'économie locale et régionale (analyse détaillée des impacts sur les industries en fonction d'une analyse de chaque site) 	Préparation gestion post-accidentelle

Tableau 17. Développements complémentaires possibles pour l'évaluation du coût de l'accident nucléaire (suite)

Analyse déjà réalisée	Développements possibles	Domaine d'intérêt des développements
<p>Evaluation du coût externe avec prise en compte de l'aversion au risque pour un scénario spécifique</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul de l'aversion au risque en prenant en compte un ensemble de scénarios d'accident et intégrant une analyse de sensibilité sur les principaux paramètres retenus - Développement théorique et application au calcul du coût avec l'aversion au risque sur la dimension "diversifiable" du risque d'accident 	<p>Robustesse coût externe</p> <p>Préparation gestion post-accidentelle</p>
<p>Recensement des méthodes d'évaluation des risques sur la base de la théorie "non-expected utility"</p>	<p>Pas de développements applicables en pratique</p>	
<p>Recensement des dimensions de la complexité associées aux situations accidentelles</p>	<p>Analyse économique des situations post-accidentelles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réflexion sur les contraintes alimentaires - Réflexion sur les indicateurs économiques susceptibles de traduire les perturbations durables de l'environnement et de la vie sociale - Réflexion sur le risque attribuable pour les effets sanitaires sur le long terme 	<p>Préparation gestion post-accidentelle</p>

CONCLUSION

L'évaluation économique de l'impact sanitaire et environnemental d'un accident, réalisée dans le cadre du projet ExternE, a permis d'obtenir un ordre de grandeur du coût externe de l'accident, pouvant être mis en perspective avec le coût externe total de la filière électronucléaire. Comme pour toute évaluation de ce type, des hypothèses restrictives ont dû être adoptées, soit par manque de données, soit par mesure de simplification des calculs. Il ne s'agit donc en aucun cas d'une valeur exacte, mais bien d'un ordre de grandeur. Les principaux paramètres qui seraient susceptibles de faire varier le coût externe de l'accident obtenu sont ceux liés aux probabilités d'occurrence de l'accident, au type de rejet considéré et à la valeur de la vie humaine retenue pour valoriser les impacts sanitaires. On ne peut néanmoins pas s'attendre à une estimation très différente du coût externe de l'accident, par une modification de ces paramètres.

Par ailleurs, il convient de garder à l'esprit les limites d'une telle évaluation. En effet, les dimensions de complexité associées aux conséquences d'un accident nucléaire rendent difficile l'appréhension de l'ensemble de ces conséquences dans une seule valeur monétaire. Ainsi, si la valeur du coût externe de l'accident est utile à des fins de mise en perspective de l'impact potentiel des filières énergétiques, il ne peut pas être utilisé pour obtenir une parfaite estimation de l'impact économique, environnemental et social d'un accident nucléaire. Pour mieux appréhender les impacts d'un tel accident, il conviendrait de poursuivre des développements, concernant notamment l'identification des acteurs qui seraient susceptibles de subir les coûts de l'accident et la définition d'indicateurs susceptibles de traduire les perturbations durables de l'environnement et de la vie économique.

REFERENCES

- [1] BRISBOIS J., et al., **Les études probabilistes de sûreté des centrales françaises de 900 et 1300 MW**, Revue Générale Nucléaire, N° 6, novembre-décembre, 1990, pp. 522-535,.
- [2] QUENIART D., **Safety of Future Reactors in France**, IPSN Report N°92/02, 1992.
- [3] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, **Severe Accident Risks: an Assessment for five US Nuclear Power Reactors, Final Summary Report**, NUREG-1150, Vol. 1, Washington, D.C., USA, December 1990.
- [4] IPSN, EDF, **Etudes probabilistes de sûreté en France. Quelle probabilité de fusion du cœur des REP ?**, Journées SFEN, 16 mai 1990.
- [5] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, **Reactor Safety Study, an Assessment of Accidental Risks in US Commercial Nuclear Power Plants**, WASH-1400, Washington, D.C., USA, October 1975.
- [6] NUCLEAR ENERGY AGENCY - EUROPEAN COMMISSION, **Probabilistic Accident Consequences Assessment Codes, Second International Comparison, Overview report**, NEA/OECD, Paris, 1994.
- [7] AGENCE DE L'ENERGIE NUCLEAIRE - ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES, **Tchernobyl, dix ans déjà, Impact radiologique et sanitaire**, AEN-OCDE, Paris, 1995.
- [8] PROULT D., DESAIGUES B., **L'évaluation de l'impact économique des situations post-accidentelles : présentation et analyse du modèle COSYMA**, Rapport CEPN R-216, juin 1993.
- [9] DREICER M., TORT V., MANEN P., **Nuclear Fuel Cycle : Estimation of Physical Impacts and Monetary Valuation for Priority Pathways**, Report CEPN-R-234, February 1995.
- [10] SCHIEBER C., BENHAMOU C., **Contribution to the Economic Module of RODOS**, Report CEPN-R-263, November, 1999.
- [11] MARKANDYA A, DALE N., SCHNEIDER T., (Eds.), **Improvement of the Assessment of the External Cost of Severe Nuclear Accidents**, Report CEPN-R-260, December, 1998.
- [12] AGENCE POUR L'ENERGIE NUCLEAIRE - ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES, **Evaluation des conséquences économiques d'un accident nucléaire**, OCDE, 2000.

- [13] COURT P., **Conséquences macroéconomiques d'un accident nucléaire**, Rapport de stage, CEPN, 1994.
- [14] EUROPEAN COMMISSION, DGXII, **Externalities of Fuel Cycles "ExternE Project" - Report n° 9 : Economic Valuation - An Impact Pathway Approach**, 1995.
- [15] EECKHOUDT L, GOLLIER C., **Risk - Evaluation, Management and Sharing**, Harvester Wheatsheaf, 1995.
- [16] EECKHOUDT L, SCHIEBER C., SCHNEIDER T., **Risk Aversion and the External Cost of a Nuclear Accident**, Journal of Environmental Management, 58, 2000, pp. 109-117.
- [17] DREICER M., TORT V., MARGERIE H., **The External Cost of the Nuclear Fuel Cycle : Implementation in France**, Report CEPN-R-238, August 1995.
- [18] VON NEUMANN J., MORGENSTERN O., **Theory of Games and Economic Behavior**, Princeton University Press, 1947, (2nd Edition).
- [19] ALLAIS M., **The so-called Allais Paradox and Rational Decisions under Uncertainty**, In: ALLAIS M., HAGEN O., (Eds.), *Expected utility hypotheses and the Allais Paradox*, Dordrecht/Boston, Reidel, pp. 473-681, 1979.
- [20] KARMARKAR U.S., **Subjectively weighted Utility: a Descriptive Extension of expected Utility Model**, Organizational Behaviour and Human Performance, Vol. 21, 1978, pp. 61-72.
- [21] MUNIER B., **Calcul économique et révision de la théorie de la décision en avenir risqué**, Revue d'économie politique, Vol. 99, n°2, pp. 276-306, 1989.
- [22] ABDELLAOUI M., MUNIER B., LEBLANC G., **La transformation subjective des probabilités face au risque : le cas de l'exposition aux rayonnements ionisants**, Rapport CEPN-R-239, décembre, 1995.
- [23] MUNIER B., PARASCHIV C., **Révélation des préférences et modélisation du comportement du décideur face au risque d'accident dans le cas du transport des substances radioactives : une généralisation du modèle attribut à la famille des modèles à dépendance de rang**, Rapport ENS-GRID, septembre 1999.
- [24] HERIARD DUBREUIL G., GIRARD P., LOCHARD J., SCHNEIDER T., **Confiance sociale et gestion post-accidentelle : les leçons de l'accident de Tchernobyl**, Annales des Mines, juillet, 1996.

ANNEXE 1 :
LA PRISE EN COMPTE DES COÛTS INDIRECTS PAR L'UTILISATION DES
TABLEAUX ENTREES-SORTIES DE LA COMPTABILITE NATIONALE

Cette annexe reprend les principaux éléments de la démarche tels que présentés dans le rapport de l'Agence pour l'Energie Nucléaire de l'OCDE⁷.

Le tableau des entrées-sorties.

L'équation sur laquelle repose le tableau des entrées-sorties est celle de l'équilibre entre les entrées (ressources) et les sorties (emplois) pour chaque branche de l'économie i , de sorte que l'on peut écrire :

$$\begin{aligned} & \text{Production}_i + \text{TVA}_i + \text{Marge commerciale}_i + \text{Importations}_i \\ & = \text{Consommation intermédiaire totale}_i + \text{Consommation finale}_i + \\ & \quad \text{Formation brute de capital fixe}_i + \text{Variations des stocks}_i + \text{Exportations}_i \end{aligned}$$

Dans la partie gauche de l'équation ci-dessus, la production recouvre la production totale, c'est-à-dire la valeur ajoutée brute au coût des facteurs plus la consommation intermédiaire de la branche donnée. Il existe une relation directe entre le revenu et les taxes (TVA et VAB). Les ressources sont normalement représentées par la somme de la production et des importations moins les exportations.

Dans la partie droite de l'équation, la demande finale peut être considérée comme la somme de la consommation finale et de la formation brute de capital fixe (investissements), des variations de stocks et des exportations.

En résumé, le tableau des entrées-sorties est un bon condensé de la structure d'un système économique donné (voir Tableau 1).

⁷

AGENCE POUR L'ENERGIE NUCLEAIRE - ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES, **Evaluation des conséquences économiques d'un accident nucléaire**, OCDE, 2000.

Tableau 1. Structure d'un tableau des entrées-sorties

	S ₁	S ₂		S _n	FD _i	O _i
S ₁	X ₁₁	X ₁₂	...	X _{1n}	FD ₁	O ₁
S ₂	X ₂₁	X ₂₂	...	X _{2n}	FD ₂	O ₂
	X _{ij}
S _n	X _{n1}	X _{n2}	...	X _{nn}	FD _n	O _n
F _j	F ₁	F ₂		F _n		
I _j	I ₁	I ₂		I _n		

où :

S_i : Secteurs économiques

Fd_i : Demande finale de chaque secteur : consommation privée et publique, investissements, variations des stocks et exportations.

F_j : Revenus des facteurs de production dans chaque secteur : VAB au coût des facteurs, impôts indirects, subventions aux entreprises et importations.

O_i : Sorties ou production totale de chaque secteur.

I_j : Entrées de chaque secteur.

X_{ij} : Production vendue par le secteur i au secteur j (consommation intermédiaire).

Pour satisfaire la demande, les entreprises doivent produire une certaine quantité de biens et services, recouvrant non seulement ceux qui sont effectivement destinés à la consommation finale, mais aussi les biens et services entrant dans les consommations intermédiaires du processus de production. Les ratios entre ces consommations intermédiaires et les entrées totales d'une branche donnée sont appelés coefficients techniques et définis de la façon suivante :

$$a_{ij} = X_{ij} / I_j$$

En combinant les coefficients techniques d'un tableau des entrées-sorties, on obtient le système d'équations suivant :

$$a_{11} I_1 + a_{12} I_2 + \dots + a_{1n} I_n + FD_1 = O_1$$

$$a_{21} I_1 + a_{22} I_2 + \dots + a_{2n} I_n + FD_2 = O_2$$

$$a_{n1} I_1 + a_{n2} I_2 + \dots + a_{nn} I_n + FD_n = O_n$$

Comme, pour le même secteur, ($i=j$), les entrées sont égales aux sorties ($I_i = O_j$), on a :

$$\begin{aligned}(1 - a_{11}) I_1 - a_{12} I_2 - \dots - a_{1n} I_n &= FD_1 \\ -a_{21} I_1 + (1 - a_{22}) I_2 - \dots - a_{2n} I_n &= FD_2 \\ (-a_{n1}) I_1 - a_{n2} I_2 - \dots + (1 - a_{nn}) I_n &= FD_n\end{aligned}$$

qui, sous forme matricielle, donne l'équation :

$$\begin{array}{cccccc} FD_1 & (1 - a_{11}) & -a_{12} & \cdot & \cdot & -a_{1n} & I_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & = & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ FD_n & -a_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & (1 - a_{nn}) & I_n \end{array}$$

L'expression ci-dessus peut être condensée sous la forme suivante :

$$\{FD_j\} = \{I - A_{ij}\} \{I_j\}$$

où : $\{FD_j\}$ est la matrice colonne de la demande finale
 I est la matrice unitaire
 A_{ij} est le coefficient technique
 I_j est la matrice colonne des sorties totales (= entrées)

La matrice $\{I - A_j\}$ est connue sous le nom de modèle de Leontief.

Répercussions des contre-mesures sur la production

Si l'on inverse la matrice de Leontief, on peut exprimer les variations des entrées en fonction des variations de la demande finale. Ainsi, si l'on connaît la demande finale $\{FD_j\}$, on peut obtenir les productions totales, à l'aide de la formule :

$$\{I_j\} = \{I - A_{ij}\}^{-1} \{FD_j\}$$

En d'autres termes, toute modification des entrées sera fonction des incréments de la demande finale :

$$\{ I_j \} = \{ I - A_{ij} \}^{-1} \{ FD_j \}$$

Par conséquent, ce modèle peut servir à évaluer l'impact sur la production totale d'un système économique de variations de la demande finale dues, par exemple, à la mise en place de contre-mesures dans une région donnée. Ce modèle fait partie de la famille des « modèles de la demande » dans lesquels on considère que les variations de la demande influenceront sur le niveau des sorties et sur la quantité de facteurs de production employés. Une fois que l'on a évalué la diminution des entrées totales, on tire la perte de la valeur ajoutée correspondante du rapport (valeur ajoutée/entrées totales) caractéristique de chaque branche.

Après l'impact initial, on peut envisager qu'il y aura un effet en retour puisque la baisse des entrées sera liée à une nouvelle baisse de la consommation finale (demande) entraînant un processus itératif dans tout le système économique (voir Figure 1), qui tendra vers une valeur asymptotique de la perte totale de production.

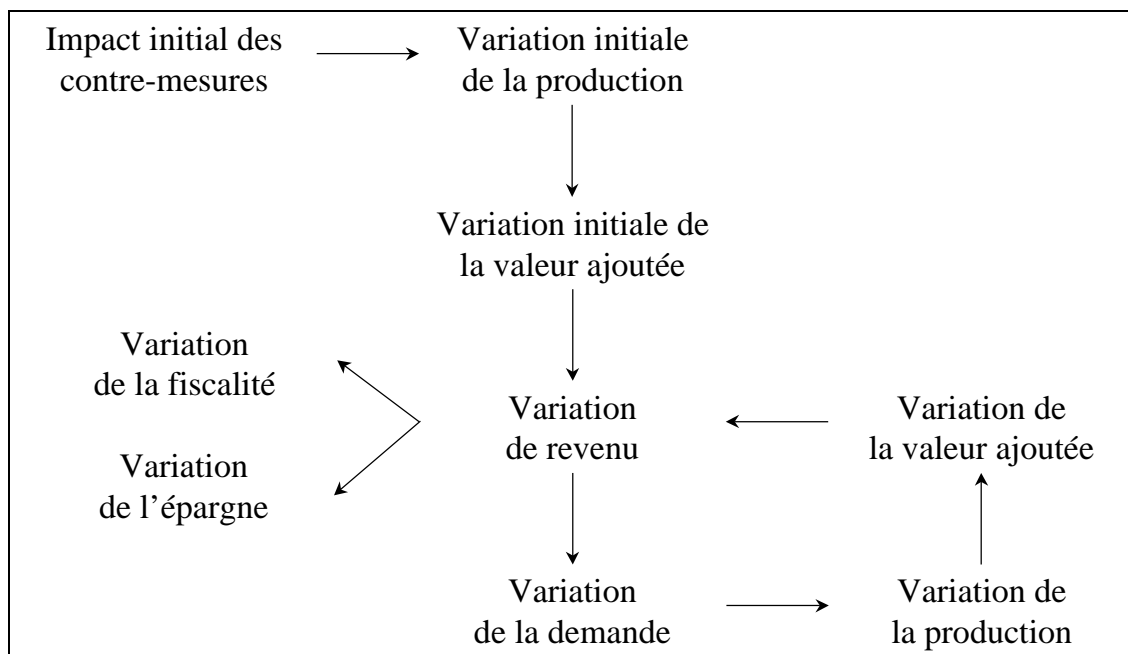


Figure 1 Effets induits d'une baisse initiale de la production sur le système économique

Il existe quelques exemples d'application des tableaux des entrées-sorties. Deux d'entre elles ont été réalisées en France : Assouline⁸ a étudié un scénario concernant le Nord-Pas-de-Calais (Gravelines, France) prévoyant l'évacuation d'une zone industrielle pendant un mois. Seules les pertes de la région touchée ont été considérées. Les pertes de valeur ajoutée résultantes, initiales et induites s'élevaient respectivement à :

Pertes initiales :	1 829	MFF	(1980)
Pertes induites :	500	MFF	(1980)

Dans le cadre des évaluations des impacts des accidents nucléaires, Cour⁹ a analysé un scénario d'accident survenant dans la région Champagne-Ardenne (Nogent-sur-Seine). A l'issue d'une analyse d'accident réalisée à l'aide du code COSYMA, un ensemble de contre-mesures « réalistes » a été défini aboutissant au relogement de 66 000 et 1 091 personnes sur des périodes d'un an et de dix ans respectivement. Seules les pertes dans la zone touchée ont été prises en compte. Les pertes totales de valeur ajoutée initiales et induites s'élevaient pour chacune des deux premières années à :

Pertes initiales de VAB :	7 424	MFF	(1989)
Pertes induites de VAB :	4 900	MFF	(1989)

Ces études de cas fournissent des indications sur la façon d'évaluer l'importance que les effets induits peuvent avoir sur l'impact économique global d'un accident (ils représentent près de 30 % de l'impact initial dans la première étude et 66 % dans la seconde). De plus, elles prouvent clairement que ces effets induits dépendent des caractéristiques du site étudié.

⁸ ASSOULINE, M. (1984), *Évaluation des conséquences socio-économiques d'une évacuation de population en cas d'accident grave d'origine industrielle*, CEA-IPSN, Rapport DPS 84/06 SEAPS, Département de la Protection Sanitaire.

⁹ COUR, Ph., (1994), *Conséquences macroéconomiques d'un accident nucléaire*, CEPN.

Difficultés rencontrées dans ces modélisations

Il est à noter que ces modélisations se heurtent à des difficultés quant aux données disponibles dans les comptes nationaux. On peut ainsi noter :

- L'absence de tableaux d'entrées-sorties établis à l'échelle régionale ou locale. Il est alors nécessaire de réaliser le calcul de la demande finale et des entrées en fonction du rapport VAB régionale/locale sur VAB nationale, et d'adopter des coefficients techniques constants (technologie identique sur tout le pays).
- L'absence de tableaux d'entrées-sorties pour les zones concernées et non concernées par les contre-mesures. Le calcul de la demande finale et des entrées doit alors se faire en fonction du rapport de la VAB pour la zone à la VAB régionale.

Soulignons également la difficulté à prendre en compte la variation de la durée des contre-mesures en fonction des zones qui rend nécessaire d'établir autant de tableaux des entrées-sorties que de périodes de temps considérées pour les zones affectées, de considérer que la structure de l'économie reste inchangée après la mise en place des contre-mesures et d'actualiser les répercussions économiques sur chaque période.