

Examen de la méthode d'analyse coût-bénéfice pour la sûreté

RAPPORT DSR N° 157

ANNEXES

Réunion du Groupe Permanent chargé des Réacteurs nucléaires du 5 juillet 2007

DIRECTION DE LA SÛRETÉ DES RÉACTEURS

ANNEXE DU CHAPITRE 4

ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES CONSÉQUENCES D'ACCIDENTS GRAVES ET ENSEIGNEMENTS

I. INTRODUCTION

La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'examen d'un outil coût-bénéfice proposé par Électricité de France pour prioriser les modifications à l'occasion de l'examen de sûreté associé à la troisième décennale du palier 900 MWe. Dans cette proposition, l'exploitant évalue les modifications potentielles selon deux paramètres, d'une part le coût estimé de ces modifications, d'autre part les bénéfices de sûreté repérés par les réductions de probabilités d'accident réalisées grâce aux modifications considérées. Les bénéfices de la sûreté sont essentiellement les coûts des accidents évités. Dans son dossier, Électricité de France examine notamment les modifications ayant pour but de faire baisser la probabilité de deux familles d'accidents : l'accident de référence « S3 » et l'accident majorant « S1 ». Le rapport des coûts évités est un des paramètres clés utilisés par Électricité de France pour comparer ces deux familles de modification.

La présente étude constitue un élément d'évaluation de la proposition d'Électricité de France. Elle a pour objectif de décrire et de quantifier les bénéfices de la sûreté par les méthodes de l'économie dans le but de proposer des outils d'allocation des ressources consacrées à la sûreté.

Cette étude effectuée dans un premier temps (parties II, III et IV) une évaluation des coûts des accidents pour l'économie française plus détaillée que celle effectuée par l'exploitant. Dans un second temps (partie V), elle s'interroge sur la métrique la plus pertinente pour comparer ces risques et donc classer les améliorations de sûreté.

Les calculs ont été effectués dans le cas de la centrale de Dampierre, centrale qui ne comporte aucun aspect particulier susceptible de rendre ce choix atypique. La méthode d'estimation des coûts consiste à rechercher systématiquement les meilleures estimations possibles sur chacun des types de conséquences identifiés en prenant garde de ne pas oublier un type de conséquence coûteux. La méthodologie est la suivante :

- pour les coûts de nettoyage et de démantèlement l'étude s'appuie sur le retour d'expérience de Three Mile Island ;
- pour les coûts de remplacement de l'énergie non produite (sur site et sur le parc entier), on a élaboré un tableur de calcul permettant de prendre en compte différentes hypothèses ;
- pour les coûts radiologiques hors site, le logiciel européen Cosyma a servi de base et ses résultats bruts ont été amendés pour améliorer le réalisme de l'estimation ;
- pour l'effet d'image, des hypothèses hautes et basses ont été posées qui permettent de tirer parti des données de la Comptabilité Nationale sur les exportations françaises ;
- pour l'effet sur le parc, en l'absence d'études plus poussées, une hypothèse plausible permet de proposer un ordre de grandeur des coûts : le passage de la durée de vie des réacteurs de 40 ans à 30 ans.

Dans le cas de l'accident majorant S1, il faut en outre compter le coût des zones d'exclusion et des zones contaminées qui ne sont pas abandonnées par la population. Pour ce faire, les surfaces sont établies à partir de séquences déterministes Cosyma (une sur cinq) et les coûts que constituent les zones contaminées sont estimés à partir des aides que devraient recevoir de telles zones, ces aides étant issues du retour d'expérience de la Biélorussie.

Ainsi, les conséquences de chacun des accidents sont décrites et quantifiées avec un certain détail de sorte que tous les coûts principaux soient couverts. Il en résulte à la fois une description de l'ensemble des conséquences et un ordre de grandeur des coûts, ce qui fournit une image de l'accident considéré. L'objectif est de proposer des ordres de grandeur qui résument les connaissances dont on dispose sur le sujet. Heureusement, ces ordres de grandeur sont suffisamment tranchés pour donner une image claire et bien contrastée de chaque accident.

Cette image est complétée par une étude de variabilité qui permet de proposer une plage de valeurs pour le coût de l'accident considéré, ces valeurs dépendant de divers paramètres comme les conditions météorologiques ou la qualité de la gestion de crise.

On déduit de ces estimations une courbe de répartition du risque d'accident nucléaire. Disposer d'une courbe de risque, même basée sur des ordres de grandeur à préciser, est une aide significative à la bonne allocation des ressources, nécessairement limitées consacrées à la sûreté. Cette allocation dépend de choix stratégiques. Ceux-ci sont discutés à partir de leur représentation par des métriques de choix. Les logiques assurantielles classiques et les choix en termes d'espérance de perte sont mal adaptés aux risques majeurs que nous considérons. On propose d'examiner d'autres métriques permettant d'intégrer une certaine aversion au risque.

II. L'ACCIDENT DE RÉFÉRENCE S3

II.1. DESCRIPTION DU SCÉNARIO

L'accident de référence S3 correspond à un scénario de fusion du cœur avec rejets contrôlés filtrés. Les rejets sont effectués 24 heures après le début de la séquence accidentelle (procédure U5). Les événements conduisant à ces rejets se traduisent par un terme source de référence (le terme source considéré dans l'étude est le terme source S3 estimé par l'IRSN). Le panache radioactif se diffuse à partir de la centrale accidentée. Dans tout ce qui suit, il s'agit de la centrale de Dampierre. Le logiciel Cosyma, dans sa version PC Cosyma (dont une rapide description figure en annexe de cette étude), calcule 144 séquences de diffusion du panache dont les dates et heures de début sont réparties uniformément tout au long de l'année. Cela permet de prendre schématiquement en compte deux saisons agricoles, l'hiver et l'été, et de prendre en compte de façon assez fine les variations de conditions météorologiques qui sont représentées heure par heure par des données représentatives du site. Dans cette section, nous exposons un scénario moyen déduit de ces 144 séquences. La variabilité est analysée en partie IV.

Dans le scénario moyen, une centaine de personnes sont évacuées des abords proches de la centrale si l'on applique les niveaux d'intervention en vigueur¹ pour l'évacuation. Avec ces mêmes critères, le confinement et la prise d'iode stable sont ordonnés sur moins de 3 km de rayon autour de la centrale. L'évaluation des coûts de l'accident de référence S3 envisage successivement : les coûts sur site, les coûts radiologiques hors-site, le coût d'image, les effets sur le parc et les effets indirects sur l'économie.

II.2. COÛTS SUR SITE

II.2.1. NETTOYAGE

Le chantier de nettoyage, sur le site de la centrale, démarre rapidement après l'accident : une année de stabilisation, une année de préparation au nettoyage et sept années de nettoyage. Le réacteur apparié est arrêté durant quatre ans, les deux autres réacteurs du site pendant trois ans. Ces trois réacteurs sont démantelés à la date prévue avant l'accident. Le réacteur accidenté est démantelé en parallèle avec les autres et pour un coût légèrement inférieur en raison du nettoyage déjà effectué. L'ensemble du chantier sera terminé N+15 années après l'accident, où N est le nombre d'années séparant l'accident de la date prévue de mise hors service et de démantèlement de la centrale.

¹ Évacuation quand la dose reçue est supérieure à 50 mSv ; confinement quand la dose reçue est supérieure à 10 mSv ; ingestion d'iode stable quand la dose à la thyroïde est supérieure à 100 mSv (arrêté du 13 octobre 2003) <http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numjo=SANY0324119A>.

Tableau A4.2.1 : Échéancier des coûts de nettoyage et de démantèlement (M€)

N = 15					N = 4					
Année après accident	S3				R4	S3				R4
	R1	R2	R3	R4		R1	R2	R3	R4	
	0	0	0	293	0	0	0	293		
	0	0	0	730	0	0	0	730		
	0	0	0	0	0	0	0	0		
	0	0	0	0	N	0	0	0		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	3433	4	4	4	3433		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	0	64	64	64	0		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	0	4	4	4	0		
	0	0	0	0	64	64	64	0		
	0	0	0	0	94	94	94	0		
N	0	0	0	0	4	4	4	266		
	4	4	4	0	4	4	4	0		
	4	4	4	0	4	4	4	0		
	4	4	4	0	19	19	19	0		
	64	64	64	0	19	19	19	0		
	4	4	4	0						
	4	4	4	0						
	4	4	4	0						
	4	4	4	0						
	4	4	4	266						
	64	64	64	0						
	94	94	94	0						
	4	4	4	0						
	4	4	4	0						
	4	4	4	0						
	19	19	19	0						
N+15	19	19	19	0						
Coût non actualisé	300	300	300	4 721	300	300	300	4 721		
Coût actualisé 4%	120	120	120	3 777	184	184	184	3 817		

Note : R4 est le réacteur accidenté, R3 le réacteur apparié

Source : Estimations à partir du retour d'expérience de Three Mile Island

	fonctionnement
	surveillance à l'arrêt
	stabilisation
	préparation au nettoyage
	nettoyage
	démantèlement normal
	démantèlement post nettoyage

Le surcoût de nettoyage et de démantèlement, actualisé à 4%, est de l'ordre de 3,6 milliards d'euros avec de faibles variations en fonction de N (à savoir la dernière ligne de la colonne R4, moins le coût hors accident, par exemple la dernière ligne de la colonne 1).

II.2.2. REMPLACEMENT

L'électricité non fournie par la centrale accidentée est produite par d'autres moyens EDF². Cette solution de remplacement coûte plus cher, notamment parce qu'elle implique des investissements non prévus qui auraient été inutiles en l'absence d'accident. Cet excès de coût mesure la perte de production ou la valeur du capital productif perdu.

L'étude suppose que la production de remplacement est assurée par des centrales modernes fonctionnant au gaz. Ces centrales ont un coût d'investissement relativement faible et leur rentabilité à court terme est bonne. Néanmoins les coûts de production sont élevés³. On aboutit au schéma suivant (Figure A4.2.1), les pertes étant actualisées au taux de 4% :

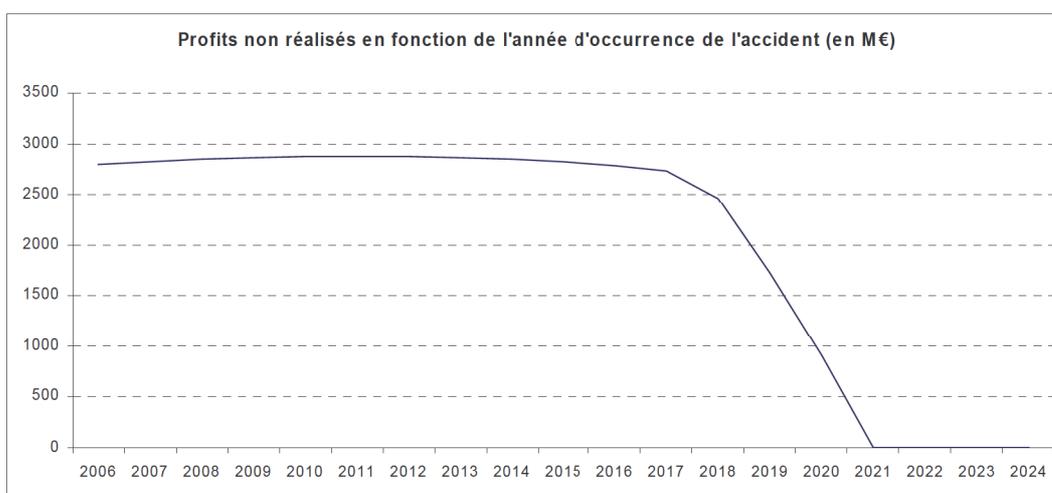


Figure A4.2.1 : Coûts de remplacement sur site

La perte diminue fortement si l'accident survient dans les dernières années de production de la centrale. Elle est relativement peu variable auparavant : sur une durée de plus de 10 ans entre 2007 et 2017, elle se situe entre 2,8 et 2,9 milliards d'euros.

On retient ici le chiffre de 2,8 milliards, en remarquant que le remplacement par des énergies fossiles produit un excès d'émission de gaz à effet de serre que nous n'avons pas chiffré.

² En effet, la perte pour l'entreprise est moindre que si elle renonçait à remplacer la production perdue. Autrement dit, la production de remplacement est bénéficiaire.

³ Nous avons retenu, pour évaluer ces coûts, une croissance annuelle des prix du combustible gaz de 5% par an. Même si les prévisions réalisées par le passé se sont toujours révélées décevantes, une hypothèse de 0% par an serait une forte sous-évaluation. Les 5% par an retenus semblent raisonnables, peut-être un peu optimistes.

Plus généralement, le remplacement par la production au gaz est un scénario raisonnable pour estimer les coûts de remplacement, mais on ne peut prétendre décrire exactement la solution, sûrement plus complexe, qui serait mise en œuvre.

II.2.3. AUTRES COÛTS

Les autres coûts sur site sont le coût radiologique pour les travailleurs du site et les coûts d'exploitation et de maintenance résiduelle pendant l'arrêt des réacteurs non accidentés. Le premier pourrait être de l'ordre de 10 h.Sv⁴ ce qui se traduirait, avec les estimations d'Électricité de France, par un coût maximal de 20 M€. Le second pourrait être de l'ordre de 500 M€.

II.2.4. TOTAL

Le coût sur site vaut alors environ 7 milliards d'euros qui se décomposent comme suit :

Tableau A4.2.2 : Coûts sur site

	milliards d'€
Nettoyage	3,6
Remplacement	2,9
Autres coûts	0,5
Total	7,0

Pour situer ce chiffre un peu abstrait, voici quelques points de comparaison :

- deux réacteurs EPR vaudraient 6 à 7 milliards d'€ ;
- pour cette somme on pourrait acheter de 35 à 40 unités à gaz de 400 MWe ;
- avec un prix de vente de 50 €/MWh, cette somme correspondrait à la valeur économique de plus de 8 ans de production de la centrale de Dampierre (4 réacteurs).

II.3. COÛTS RADIOLOGIQUES HORS SITE

Les rejets radioactifs hors du site sont faibles. Le coût total hors site reste limité. Les mesures d'urgence destinées à éviter l'exposition des populations au nuage radioactif sont limitées. En revanche, l'étude considère que les populations boycottent les produits contaminés, la perte de production alimentaire est donc très élevée. Enfin, des cancers radio-induits se manifesteront longtemps après la date de l'accident ; l'étude considère que leur coût est relativement faible.

II.3.1. MESURES D'URGENCE

Les mesures d'urgence sont bien connues : prise d'iode stable, confinement, et si nécessaire évacuation. L'étendue de ces mesures est calculée par Cosyma à partir des niveaux d'intervention associés à la mise en œuvre de mesures de protection en vigueur (voir chapitre II.1). Dans le cas de l'accident de référence, elles se traduisent par un coût modique de 0,1 M€ :

⁴ Cela correspondrait, par exemple, à l'exposition de 50 personnes au niveau de 200 mSv.

Tableau A4.2.3 : Mesures d'urgence

	Nombre de personnes	Surface km ²	Coût M€
Évacuation	102	2	0,1
Confinement	2 693	18	-
Distribution d'iode	3 101	21	-
Total			0,1

L'étude considère que le confinement et la distribution de comprimés d'iode stable coûtent très peu cher et que le coût de l'évacuation est inférieur à 1000 € par personne, montant faible parce que l'évacuation est proche (60 km) et ne dure pas longtemps (en général, de une à deux semaines). Ces hypothèses sont sans doute optimistes.

Le préfet, gestionnaire local de l'urgence, prend vraisemblablement des mesures plus étendues que celles, optimisées en situation de connaissance parfaite, suggérées par le code, non seulement parce qu'il y a incertitude sur les données (terme source, météo, etc.), mais aussi pour prendre en compte une éventuelle dégradation de la situation (fuite de l'enceinte en particulier).

Au total, toutefois, il est peu probable que les coûts dépassent 0,2 M€, une somme faible au regard des autres coûts.

II.3.2. INTERDICTIONS ALIMENTAIRES

Une fois le panache dispersé, des dépôts demeurent sur le sol, les prairies, les champs, les cultures maraîchères non protégées, etc. Ces dépôts ne sont pas considérables ; aucune zone n'est contaminée au-delà de 37 000 Bq/m². Néanmoins, la chaîne alimentaire est affectée. Les autorités sont chargées de prendre des mesures d'interdictions alimentaires.

Le gestionnaire de crise est confronté à plusieurs « normes » et au précédent historique de l'accident de Tchernobyl. Le tableau suivant présente une situation, certes schématique, eu égard aux différents textes en vigueur.

Normes radiologiques de commercialisation des aliments	
Normes minimales	<i>1 250 Bq/kg pour tous les aliments. C'est la norme européenne officielle en cas d'accident.</i>
Normes moyennes	<i>370 Bq/l de lait 600 Bq/kg pour les autres aliments. C'est la norme européenne de commercialisation. Elle s'applique, par exemple, aux productions en provenance des zones contaminées par l'accident de Tchernobyl.</i>
Normes biélorusses	<i>100 Bq/kg pour tous les aliments. Cette norme se rapprocherait des normes en vigueur en Biélorussie. Elle traduirait à la fois un grand souci de protection des populations et le désir de limiter l'effet d'image que ne manquerait pas de produire un accident nucléaire.</i>

Comment choisir ? Il est probable que le gestionnaire de crise sera tenté d'aller au-delà de la norme minimale. Mais il est également probable que l'instauration d'une norme risque d'être sans grand effet et que, sous la pression des associations et d'une grande partie de la société civile, les consommateurs se rappellent le souvenir (encore vivace !) du « *nuage de Tchernobyl qui s'est arrêté à la frontière* », qu'ils accordent peu de crédit aux autorités et boycottent les produits contaminés. C'est ce qui a été observé lors des crises de la vache folle et de la grippe aviaire. C'est aussi ce vers quoi pourraient s'orienter les distributeurs (Auchan, Carrefour, etc.) soucieux de préserver leur image et qui n'auraient guère de difficulté pour proposer des produits de substitution parfaitement sains. Même les producteurs pourraient être favorables à ce type de solution dans la mesure où on leur promettrait des dédommagements.

L'étude retient donc le boycott comme hypothèse centrale⁵.

Avec cette hypothèse, le code Cosyma calcule des pertes alimentaires s'élevant à 4,6 milliards d'euros sur deux ans. Mais il ne considère aucune contremesure agricole. Or, l'expérience de Tchernobyl enseigne que le lait peut être transformé en beurre sain et que la viande peut être consommée après un traitement des animaux au bleu de Prusse (ou autre liant du césium) et un régime au fourrage « propre ». Avec contremesures, nous estimons que cette perte peut être ramenée à environ 3 milliards d'euros sur deux ans. À titre de comparaison, la production agricole française est d'environ 150 milliards d'euros sur deux ans et la perte serait donc de 2% de la production.

⁵ Ce qui se traduit dans les calculs par un niveau de contamination limite de 10 Bq par kg ou par litre

II.3.3. EFFETS SANITAIRES À LONG TERME

D'après les calculs du code, les effets sanitaires sont des effets à long terme de type stochastique. Il n'y a aucun « grand brûlé nucléaire » sauf peut-être sur le site, dans un cas défavorable. En raison du boycott (hypothèse d'étude), le nombre de cancers dus à l'ingestion de denrées contaminées est très faible : 9 cancers mortels et 9 cancers non mortels. Les effets sanitaires sont donc essentiellement dus à l'exposition au panache radioactif. Au total (Tableau A4.2.4), le nombre de cancers radio-induits est relativement faible et les coûts correspondants relativement modestes :

Tableau A4.2.4 : Effets sanitaires à long terme

	Nombre de cas	de Coût unitaire	Coût M€
Cancers mortels	40	909 000	37
Autres cancers	248	91 000	23
Effets héréditaires	1,9%		1
Total	288		60

La valorisation d'un cancer mortel, 900 000 € environ, est calculée comme suit :

- valeur d'un décès statistique = 2,5 M€ ; cette valeur est une valeur moyenne provenant, notamment, des études ExternE conduites avec le soutien de la Commission Européenne ;
- nombre moyen d'années perdues lors d'un décès = 44 ans ;
- nombre moyen d'années perdues lors d'un décès par cancer mortel dû aux rayonnements ionisants = 16 ans soit environ 40% du chiffre précédent ;
- la valeur est proportionnelle au nombre d'années perdues ($0,9/16 = 2,5/44$) ;
- aucune actualisation supplémentaire n'est appliquée afin de ne pas introduire de biais entre les générations.

Au total, les coûts radiologiques hors site sont alors les suivants, pour l'accident de référence S3 :

Tableau A4.2.5 : Coûts radiologiques hors site

Coûts radiologiques hors site	M€
Effets sanitaires à court terme	0
Contremesures d'urgence	0
Effets sanitaires à long terme	60
Interdictions alimentaires	3 089
Total	3 149

L'aspect agroalimentaire du coût radiologique est totalement dominant. La valorisation de la santé ne joue qu'un rôle secondaire. Au total, le coût radiologique ne vaut que 45% du coût sur site. Il n'y a pas

de contamination durable du territoire et la description qui précède suggère que l'on a affaire à un accident technologique comparable à d'autres. Cette image est mise en défaut par les coûts pour l'économie que nous abordons maintenant.

II.4. COÛT D'IMAGE

II.4.1. EXPORTATIONS AGRO-ALIMENTAIRES

L'effet médiatique d'un accident de fusion du cœur avec rejets est immense. Les victimes sont montrées au journal télévisé, les images tournent en boucle, les archives disponibles sont exhumées et largement commentées, etc. Toutes les télévisions du monde veulent tourner leurs images et y parviennent.

Les exportations agro-alimentaires françaises sont frappées par cet effet d'image, tout particulièrement les produits emblématiques tels que le vin, le foie gras, etc.

Dans le présent scénario, la gestion de crise, notamment la gestion d'image, est de bonne qualité et, compte tenu de la faible ampleur des rejets, l'effet d'image reste cantonné à deux ans. Il se traduit par une réduction de 17 % des exportations la première année et de 8 % la deuxième année. La baisse du chiffre des exportations est de l'ordre de 7 et 3,5 milliards d'euros. La perte économique (perte de valeur ajoutée) s'élève à 2 milliards la première année et 1 milliard la deuxième année. Ce scénario est donc nettement favorable sur cet aspect.

II.4.2. TOURISME

Autre secteur touché, celui du tourisme. Mais les rejets étant limités, l'effet reste faible. Les répercussions de l'accident sont très variables en fonction de la catégorie de tourisme. Le tourisme national, celui des français en France, n'est pas réduit. Il y a substitution, les régions éloignées des rejets, et dont on peut garantir qu'elles ne sont pas touchées, bénéficient des baisses de fréquentation plus près du site. Le tourisme de nos voisins proches tels que Britanniques ou Hollandais est peu touché : -10% la première année, rien ensuite. Le tourisme international lointain, tel que celui en provenance des États Unis, du Japon ou de la Chine baisse plus nettement : -20% la première année, -10% la seconde année et rien ensuite.

Ces effets peuvent surprendre par leur modestie, mais sont cohérents avec le retour d'expérience dans ce domaine : les conséquences de la marée noire de l'Erika, les mitraillages de touristes en Égypte, les bombes à Bali. Dans tous ces cas, l'activité touristique a vite retrouvé ses niveaux antérieurs. Au total (Tableau A4.2.6), la perte est de 2,5 milliards d'euros sur deux ans, l'essentiel de la baisse étant due au tourisme lointain :

Tableau A4.2.6 : Effet d'image sur le tourisme

Années	Tourisme national		Tourisme proche		Tourisme lointain		Total
	%	G€	%	G€	%	G€	G€
1	0%	0	10%	0,8	20%	1,1	2,0
2	0%	0	0%	0,0	10%	0,6	0,6
3	0%	0	0%	0,0	0%	0,0	0,0
Total		0		0,8		1,7	2,5

II.4.3. AUTRES EXPORTATIONS

Les concurrents des exportateurs français s'évertuent à faire jouer au maximum l'effet négatif de l'accident sur l'image de la technologie française. Ils n'y parviennent que très peu. La réduction des autres exportations n'est que de 2,5% la première année puis de 1,5% et de 0,75% les deux années suivantes. Mais ces faibles pourcentages s'appliquent à une masse de quelques 400 milliards d'exportations qui correspondent, en 2005, à 113 milliards d'euros de valeur ajoutée. L'effet est donc loin d'être négligeable (Tableau A4.2.7) :

Tableau A4.2.7 : Effet d'image sur les autres exportations

Années	Réduction des autres exportations	
	%	M€
1	2,5%	3
2	1,5%	2
3	0,8%	1
Total		5

II.4.4. EFFETS INDIRECTS

Les trois types de réduction de demande étrangère présentés ci-dessus induisent des effets indirects négatifs. Par exemple, les fournisseurs de tel exportateur directement touché ressentent indirectement l'effet d'image quand cet exportateur réduit ses commandes auprès d'eux. Ce type d'effet indirect est connu en économie. Il s'estime à partir de la Comptabilité Nationale par la méthode des matrices de Léontieff ou méthode des tableaux entrées-sorties.

Voici l'effet cumulatif indirect actualisé à 4% d'une variation de 1 en année 0 tel que calculé par cette méthode :

Tableau A4.2.8 : Effets d'image unitaires indirects cumulés et actualisés à 4%

Années	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Agriculture et IAA	1	0,6	1,0	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
Tourisme	1	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
Autres exportations	1	0,7	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6

Note : l'année 0 est celle de la perturbation initiale, les années suivantes représentent les effets indirects cumulés. La perturbation initiale étant prise égale à 1, il s'agit des coefficients de propagation unitaires de la perturbation au sein de l'économie.

Si les effets directs d'une conséquence d'accident sont répartis sur plusieurs années (1, 2 et 3, par exemple), les effets indirects de chacune de ces années (1, 2 et 3) doivent être cumulés année par année (par exemple sur cinq ou dix ans).

La plupart des effets indirects apparaissent dans les trois années suivant la variation initiale. L'effet indirect est plus faible dans le secteur du tourisme. Dans les autres secteurs, il est supérieur à 1. Ces effets unitaires s'appliquent aux estimations des effets directs :

Tableau A4.2.9 : Effets d'image directs et indirects (milliards d'euros)

	Effet direct	Effet indirect	Total	
Agriculture et IAA	3	5	8	28%
Tourisme	3	3	6	23%
Autres exportations	5	8	13	49%
Total	11	16	27	100%

Au total, la baisse directe des exportations françaises due à l'effet d'image vaut environ 11 milliards d'euros soit plus que le coût sur site. Les effets indirects, dont l'essentiel est ressenti dans les cinq années suivant l'accident, valent 145% des effets directs soit 16 milliards d'euros. L'estimation d'ensemble arrive à 27 milliards d'euros.

II.4.5. L'EFFET D'IMAGE EST CONSIDÉRABLE

La conclusion de l'exercice mené ci-dessus est que l'effet d'image est considérable. Cette conclusion semble solide, pour au moins trois raisons :

1. les pourcentages de baisse de demande extérieure retenus sont faibles ; ils se situent clairement, de notre point de vue, du côté de l'effet minimal ; proposer des pourcentages plus faibles exigerait, à notre sens, des arguments très forts ;
2. ces pourcentages faibles supposent que la gestion de crise soit particulièrement performante au regard de l'effet d'image, indépendamment de l'importance réelle des rejets, ce qui n'est jamais acquis tant la matière est difficile ;

3. certains effets possibles n'ont pas été envisagés, par exemple :

- une possible baisse des investissements étrangers en France ;
- une baisse de demande intérieure que pourrait entraîner une baisse marquée de la Bourse de Paris ;
- ou encore une baisse des investissements qui pourrait concrétiser une baisse marquée du moral des patrons français.

Il nous paraît très difficile de suggérer, au vu des estimations ci-dessus, que l'effet d'image puisse être inférieur à 20 milliards d'euros, alors qu'inversement, il ne nous paraît pas impossible que cet effet se monte à 50 milliards d'euros voire plus. Notamment si l'image exportatrice de la France n'est pas correctement défendue par un effort coordonné, durable, intelligent et motivé par l'ampleur de l'enjeu (le récent échec pour obtenir la tenue des Jeux Olympiques à Paris incite à la modestie dans ce domaine).

Il convient de souligner qu'il s'agit d'un effet national. La demande qui fait défaut aux exportateurs français est satisfaite par d'autres, par exemple par des exportateurs européens. Du point de vue de l'économie européenne dans son ensemble, il n'y a que peu d'effet d'image d'ensemble : la production se déplace, avec substitution d'exportations non françaises aux exportations françaises rejetées par les consommateurs et les importateurs. A contrario, le niveau national envisagé ici ne prend pas en compte l'effet d'image régional pour les régions touchées par l'accident. L'analyse en est complexe, probablement assez variable selon le type de région concernée.

II.5. EFFETS SUR LE PARC

Les autorités françaises, poussées par la vague médiatique, soutenues par les experts et les organisations internationales, se doivent d'améliorer la sûreté du parc électronucléaire français. Les solutions extrêmes que proposent certains semblent également improbables :

- ne rien faire, de manière ouverte ou plus ou moins dissimulée. Cela semble impossible dans l'état actuel des choses, mais dans d'autres circonstances, comparables par exemple au choc pétrolier des années 1970, voire plus graves, le monde politique pourrait décider de « ne rien faire ». Ce scénario mériterait d'être approfondi, car « ne rien faire » impliquerait toutefois de nombreux ajustements, révisions, contrôles, arrêts qui seraient tous coûteux pour Électricité de France ;
- stopper les centrales françaises dès que possible. L'arrêt du nucléaire semble encore plus impossible, mais on peut peut-être imaginer des circonstances, aujourd'hui improbables, probablement très graves, où le monde politique déciderait de mettre fin le plus vite possible à la production d'électricité nucléaire en France. Ce scénario mériterait aussi d'être approfondi, car les délais de mise en place de solutions de remplacement et les effets positifs de ce remplacement ne sont pas simples à envisager.

Le présent scénario considère que, de manière comparable à la décision de sortie du nucléaire prise en Allemagne, les autorités décident de ramener la durée de vie des réacteurs de 900 MWe de 40 ans à 30 ans. Ce remplacement est effectué par des centrales à gaz modernes de 400 MWe⁶. Idéalement, il

⁶ Le calcul a aussi été effectué en considérant le remplacement par des réacteurs EPR même si cette hypothèse est sans doute plus sujette à critique après un accident *nucléaire*. Ce remplacement n'est pas immédiat puisque le

faudrait envisager plusieurs scénarios situés entre les deux extrêmes, comprendre les déterminants en jeu et proposer, en fin d'analyse, un spectre de coûts et des recommandations pour limiter ces coûts au maximum. Un tel programme étant hors de portée de la présente analyse, nous envisageons un scénario moyen. Ce scénario pose de nombreuses questions, certes, notamment relatives à l'effet de serre et à la sûreté des approvisionnements. Il est, néanmoins, plausible et offre un ordre de grandeur des effets sur le parc. Le coût de remplacement⁷ est appliqué à la structure du parc pour donner le coût total de remplacement en fonction de la date de l'accident (Figure A4.2.2) :

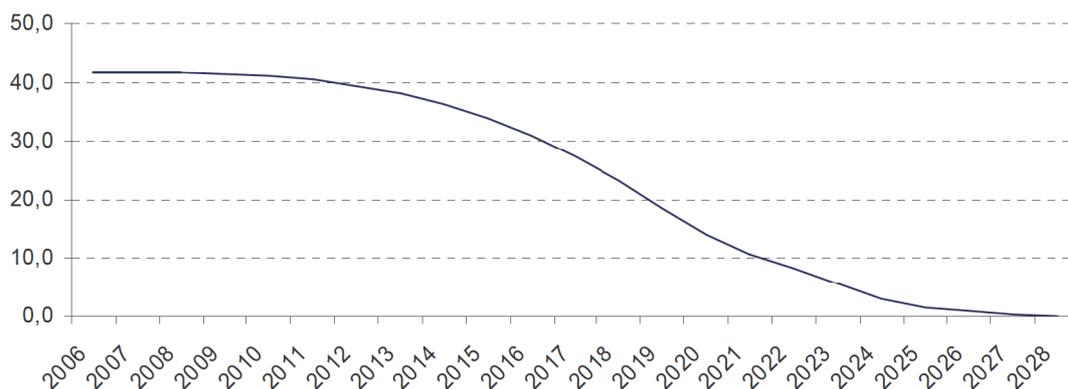


Figure A4.2.2 : Coût en milliards d'euros de la réduction de la durée de vie des réacteurs de 900 MWe, de 40 ans à 30 ans, en fonction de la date de l'accident⁸

Dans ce scénario très simplifié, le coût de l'effet sur le parc dépend fortement de la date de l'accident et décroît en fin de vie du parc 900 MWe. C'est quelque peu schématique, car en réalité, l'effet parc pourrait se déplacer, en fin de vie des 900 MWe, vers le reste du parc nucléaire, voire vers le parc de remplacement des 900 MWe. On retient donc un ordre de grandeur de 35 milliards d'euros pour couvrir l'ensemble de l'effet sur le parc, sachant que cet effet ne se réduit pas au coût des réductions de vie des 900 MWe, mais comporte aussi de nombreuses actions de maintenance et des modifications supplémentaires se traduisant par des coûts directs et des baisses de charge.

Cet ordre de grandeur montre que l'effet sur le parc est considérable. Cet effet mérite d'être étudié de façon beaucoup plus approfondie.

délai de construction d'un EPR est de 5 ans minimum. Ce scénario comporte donc gaz et EPR. Il économise au plus 20% du montant envisagé ci-dessus. Ce faible écart ne jouera pas en faveur de l'EPR. Il ne permet pas de remettre en cause les ordres de grandeurs proposés.

⁷ Calculé comme pour le remplacement de la production du réacteur accidenté et des autres réacteurs de la centrale temporairement arrêtés.

⁸ Pour ce calcul, on a préféré supposer que l'accident survient dans la centrale mise en service le plus près de la date moyenne au sein du programme de construction des 900 MWe à savoir la centrale du Blayais.

II.6. EFFETS INDIRECTS SUR L'ÉCONOMIE

Les effets indirects de la baisse de demande extérieure sont indiscutables et ont été pris en compte dans l'estimation du coût d'image.

Les autres effets indirects possibles sont les suivants :

1. effet d'entraînement du chantier de nettoyage sur site ;
2. effet négatif de la baisse de production agricole dans les régions touchées ;
3. effet positif du remplacement anticipé des réacteurs 900 MWe sur l'économie.

Les effets 1 et 2 sont indéniables au plan régional. Néanmoins, le chantier de nettoyage n'est pas suffisamment important pour avoir un impact national et les productions agricoles non assurées dans les régions touchées sont compensées par d'autres régions françaises. Il y a substitution. L'effet indirect est négligeable au plan national.

En revanche, le remplacement anticipé des réacteurs de 900 MWe est une vaste opération industrielle qui devrait avoir un effet d'entraînement sur l'économie, effet qu'il faut déduire des coûts. Nous estimons que cet effet est au maximum de 5 milliards d'euros, ce maximum étant réalisé dans les conditions suivantes :

- toutes les centrales sont effectivement concernées ; l'accident survient donc avant l'arrêt de la centrale de Fessenheim, la première mise en service ;
- l'effet d'entraînement n'est pas limité par les capacités de production ;
- l'effet d'entraînement n'est pas diminué par un effet de substitution, ce qui se produirait si l'activité déployée pour le renouvellement anticipé du parc provoquait la réduction d'autres chantiers.

Ces hypothèses sont fortes. L'effet positif est donc inférieur à 5 G€, probablement autour de 3 G€.

II.7. LE COÛT DE L'ACCIDENT DE RÉFÉRENCE S3

Le Tableau A4.2.10 reprend les estimations qui précèdent :

Tableau A4.2.10 : Coût total de l'accident de référence S3 (scénario de base)

	Milliards d'€
Coûts sur site	7
Nettoyage	3,6
Remplacement	2,9
Autres	0,5
Coûts radiologiques hors site	3
Effets sanitaires à court terme	0,0
Contremesures d'urgence	0,0
Effets sanitaires à long terme	0,1
Interdictions alimentaires	3,1
Coût d'image	27
Exportations agricoles	3
Tourisme	3
Autres exportations	5
Effets indirects	16
Effets sur le parc	35
10 ans de vie en moins sur les 900MWe	35
Effets indirects	-3
Remplacement du parc 900 MWe	-3
Total (arrondi)	70

Que représente une telle somme ? En termes familiers au secteur électro nucléaire, c'est :

- environ 70% de la capitalisation boursière d'Électricité de France (annoncée à 100 M€ fin 2006, plus élevée depuis) ;
- plus de 20 réacteurs EPR ;
- plus de 10 ans de profit de l'ensemble du parc 900 MWe⁹.

On a coutume d'observer que les accidents technologiques sont d'ampleur nettement inférieure aux catastrophes naturelles, en moyenne d'un facteur 10. Cette observation est globalement exacte. Néanmoins, l'accident de référence S3 considéré ici la met en défaut, car il est comparable, par son coût de 70 milliards d'euros, aux plus grandes catastrophes naturelles connues à ce jour :

⁹ 30 réacteurs dont le profit annuel est d'environ 200 M€ à savoir quelques 6 TWh vendus autour de 50 €/MWh avec un coût de production (hors capital) voisin de 15 €/MWh.

Inondations en France (année moyenne)	1 milliard d'euros
Tempêtes de 1999 en France	13 milliards d'euros
Possible inondation centennale de Paris (estimation)	10 à 30 milliards
Attentats du 11 septembre 2001, cyclone Katrina, tremblement de terre de Kobé	60 à 80 milliards

En fait, l'accident de référence est d'ampleur nationale car il coûte :

- plus de 4% du PIB soit environ deux années de croissance française,
- 1,25 fois l'impôt annuel sur le revenu en France,
- 1,5 fois le déficit public de la France.

Il revêt un caractère national, la France souffrant dans son électricité et dans ses exportations comme le montre la structure des coûts (Tableau A4.2.11) :

Tableau A4.2.11 : Structure des coûts de l'accident de référence (scénario de base)

Coûts sur site	10%
Coûts radiologiques hors site	4%
Coût d'image	39%
Effet sur le parc	50%
Effets indirects	-4%
Total arrondi	100%

Ce tableau sombre est quelque peu allégé par le fait que l'accident causera peu de morts « directs ». Les morts seront en général différées et le lien de cause à effet sera difficile à démontrer. Les victimes économiques seront des agriculteurs directement concernés et surtout des victimes indirectes touchées dans leur revenu économique ou par le coût de l'électricité.

Cette observation ne doit pas minorer l'effet symbolique très fort d'un tel accident et la nécessité impérieuse d'une gestion efficace de cet aspect. Il suffit de se rappeler les retombées de Tchernobyl en France !

III. L'ACCIDENT MAJORANT

III.1. DESCRIPTION DU SCÉNARIO

L'accident majorant pris en compte ici est du type S1. Par simplification, le scénario considère la dispersion en deux heures d'un tiers de l'inventaire du cœur, ce qui est le bon ordre de grandeur pour le césium, contributeur prépondérant des coûts. Pour être plus réaliste, il faudrait établir une gamme de termes source accompagnés de leurs probabilités d'occurrence.

Comme pour l'accident de référence, PC Cosyma (voir description en annexe) calcule 144 séquences de diffusion du panache radioactif. Nous exposons ici un scénario médian basé sur ces 144 séquences, la variabilité étant analysée en partie IV.

Le logiciel calcule qu'il faudrait évacuer en moyenne 2,6 millions de personnes qui peuplent une zone de 25 000 km²¹⁰, si l'on considère les niveaux d'intervention associés à la mise en œuvre de mesures de protection en vigueur (voir paragraphe II.1).

III.2. COÛTS SUR SITE

L'étude considère que le site est fermé et ne sera pas redémarré. Le coût du nettoyage et le coût de remplacement de l'électricité non produite sont donc élevés, car la production des trois réacteurs non accidentés est intégralement perdue et leur démantèlement est avancé.

Le coût total de nettoyage des réacteurs, basé sur un accident moins grave (le retour d'expérience de Three Mile Island), se monte à 4,4 milliards d'euros et la perte due à l'accident vaut en moyenne 3,9 milliards d'euros (la différence étant due au coût de démantèlement sans accident comme pour l'accident S3). En outre, le site lui-même est considérablement plus pollué que dans le cas de l'accident de référence S3. Comme dans le cas de Tchernobyl, il faut alors réaliser un « nettoyage » approfondi du site, d'où un montant de 4,5 G€ pour le coût total de nettoyage. L'étude considère néanmoins que la construction d'un sarcophage ne se révèle pas nécessaire, ce qui évite aux coûts de monter à quelques 5 milliards d'euros voire plus (le nouveau sarcophage à construire à Tchernobyl est évalué à 1 milliard d'euros environ). Ces hypothèses peuvent être discutées.

Les coûts de remplacement sont nettement plus élevés que dans le cas de l'accident de référence (2,9 G€, voir II.2.2.) puisque le site est fermé et qu'il faut remplacer toute l'énergie produite par quatre réacteurs durant la durée de vie restante. Ils baissent beaucoup plus régulièrement comme indiqué Figure A4.3.1 :

¹⁰ Ce qui équivaut à une zone circulaire de 90 km de rayon autour de la centrale de Dampierre. Une telle zone circulaire contient Orléans et arrive aux portes d'Auxerre à l'est et de Bourges au sud.

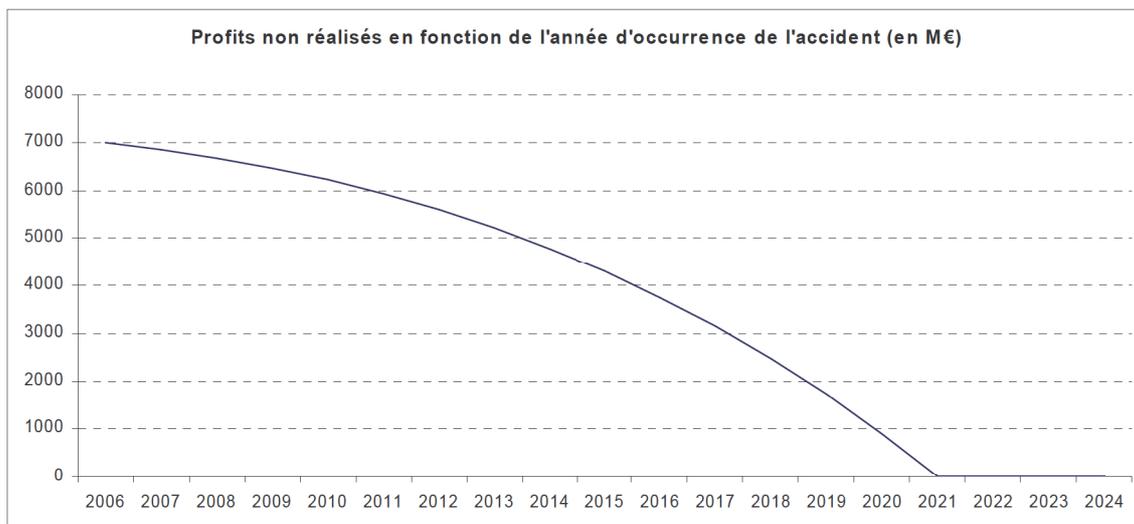


Figure A4.3.1 : Coût de remplacement sur site

La perte maximale est voisine de 7 G€, la perte médiane vaut 5,2 G€ et la perte moyenne 4,8 G€. Dans ce scénario, le remplacement de l'électricité non produite représente une perte moyenne de l'ordre de 5 G€.

Les coûts radiologiques sur site sont jusqu'à 5 fois plus élevés que dans le cas de l'accident de référence, soit 0,1 G€. En revanche, l'exploitation résiduelle est moins importante que si les réacteurs devaient redémarrer, même si Électricité de France doit réaffecter les employés de la centrale ce qui représente des coûts non négligeables. On retient la même estimation que pour l'accident de référence S3, à savoir 500 M€.

Au total, les coûts sur site se résument dans le Tableau A4.3.1 :

Tableau A4.3.1 : Coût sur site

	milliards d'€
Nettoyage	4,5
Remplacement	5,0
Autres coûts	0,5
Total	10,0

Les coûts sur site sont donc ainsi seulement 40 à 50 % plus élevés que ceux de l'accident de référence S3.

III.3. COÛTS RADIOLOGIQUES HORS SITE

Les rejets radioactifs hors du site sont considérables.

III.3.1. MESURES D'URGENCE

L'étendue des mesures d'urgence est importante pour l'accident majorant. Le tableau A4.3.2 présente les mesures calculées par le code Cosyma à partir des niveaux d'intervention en vigueur :

Tableau A4.3.2 : Mesures d'urgence « optimales »

	Nombre de personnes	Surface km ²	Rayon équivalent (km)	M€
Evacuation	2 621 000	25 110	89	2 119
Confinement	273 300	4 947	40	0
Distribution d'iode	2 999 000	26 980	93	0

Des mesures d'une telle ampleur sont irréalisables, d'autant plus que les rejets surviennent brutalement et sont entièrement effectués en 2 heures. Le coût des mesures d'urgence peut alors être estimé comme ce coût avec mesures « optimales » (2,1 milliards d'euros), augmenté d'un coût dû à l'impossibilité de réaliser les mesures optimales.

Estimer l'ordre de grandeur de ce dernier coût présente une difficulté : un scénario réaliste devrait décrire des mesures d'urgence prises assez loin du site pour que les responsables disposent d'un temps de réponse raisonnable, mais le code Cosyma ne permet de calculer que des mesures prises autour du site. Voici donc des mesures calculables par le code, destinées à estimer le coût supplémentaire dû à l'impossibilité de mettre en œuvre les mesures correspondant aux niveaux d'intervention :

- évacuation dans un rayon de 10 km, ce qui correspond à l'évacuation de 25 000 personnes environ ;
- confinement sur une cinquantaine de kilomètres de rayon, ce qui correspond à environ 1 500 000 personnes confinées ;
- prise d'iode stable dans un rayon de 20 km environ, ce qui correspond à quelques 320 000 personnes.

De telles mesures d'urgence se traduisent par un coût 100 fois plus faible que les mesures « optimales » comme indiqué au tableau A4.3.3 :

Tableau A4.3.3 : Mesures d'urgence « réalistes »

	Nombre de personnes	Surface km ²	Rayon équivalent (km)	M€
Evacuation	25 190	314	10	20
Confinement	1 445 000	9 538	55	
Distribution d'iode	321 200	1 810	24	

Néanmoins, ces mesures ne peuvent pas réduire l'impact sanitaire de l'accident aussi efficacement que les mesures optimales : elles impliquent quelques 10 000 cancers mortels supplémentaires (résultat probabiliste moyen calculé par Cosyma avec les hypothèses ci-dessus). Le surcoût dû à l'impossibilité de mettre en œuvre les mesures d'urgence « optimales » (selon les normes radiologiques) est ici d'environ 7 milliards d'euros : + 9 milliards de coûts sanitaires - 2 milliards économisés sur les évacuations.

Ce surcoût de 7 milliards d'euros devrait représenter un maximum, car des mesures de plus grande ampleur devraient pouvoir être prises à distance du site.

On retient la valeur moyenne de 3,5 milliards d'euros pour la sous-optimalité des mesures d'urgence.

III.3.2. ÉVACUATIONS SANS RETOUR

Cosyma évalue le coût des 25 000 évacuations ci-dessus autour de 1000 € par personne. C'est dire que ces évacuations ne durent pas longtemps et que les évacués peuvent ensuite retourner chez eux. Ce sont des évacuations limitées dans des zones finalement assez peu touchées.

Or, dans les jours et les semaines qui suivent l'urgence, un grand nombre de mesures de la contamination du territoire sont effectuées par les autorités, mais aussi par les associations, voire par les médias, qui révèlent une contamination désastreuse. Ce sont plus de 13 500 km² qui sont contaminés en césium 137 au-delà du niveau de 15 Ci/km² (555 000 Bq/m²), sans compter la contamination par d'autres radionucléides. On a vite fait d'évoquer le précédent de Tchernobyl : les personnes ont été évacuées de tels territoires en Russie, en Ukraine et en Biélorussie. Peut-on faire moins en France ? Ce sont ainsi environ 1,5 million de personnes qui, plus ou moins rapidement, deviennent des « réfugiés radiologiques », des personnes qui ne peuvent pas retourner chez elles¹¹.

Il existe un exemple récent d'une telle évacuation définitive : le cyclone Katrina. Les autorités américaines ont indiqué avoir dépensé, pour reloger les victimes ayant tout perdu, une somme de 24 000 \$ par personne durant les 12 mois suivant la catastrophe. Sur la base de ce chiffre tronqué à 12 mois, l'ensemble des coûts sociaux de réinstallation pourrait être de l'ordre de 30 000 €/personne.

La simple multiplication de ce coût unitaire par le nombre de réfugiés radiologiques conduit alors à un coût d'environ 45 milliards d'euros. C'est là un montant considérable, qui approche le montant annuel de l'impôt sur le revenu. On est donc fondé à objecter que de tels montants seront très difficiles à mobiliser pour indemniser les évacués. Peut-on pour autant supposer que les évacuations seront beaucoup moins nombreuses ? Peut-on supposer que les autorités françaises autorisent le séjour sur de tels territoires alors que les autorités biélorusses l'interdisent ? Il n'est pas nécessaire de se prononcer sur cet aspect du scénario pour retenir le chiffre de 45 milliards d'euros, un chiffre qui se contente d'évaluer le coût social des évacuations sans retour, sans pour autant affirmer que de tels montants d'indemnisation seraient effectivement versés aux victimes.

¹¹ Dans les régions fortement urbanisées, il est possible qu'une décontamination intense et suivie permette de réduire significativement la contamination pour arriver en dessous de la limite de 15 Ci/km². Une telle action serait coûteuse, mais devrait réduire le coût que nous examinons. En revanche, si des zones fortement urbanisées étaient atteintes, le coût total de la contamination devrait s'en trouver fortement augmenté. Voir ci-après.

III.3.3. EFFETS SANITAIRES À LONG TERME

Les effets sanitaires à court terme restent, heureusement, négligeables (le code calcule un total de 1,5 effet non mortel) compte tenu des mesures prises ; ce chiffre est théorique compte tenu du caractère théorique des mesures d'urgence autour du site.

S'agissant de l'ingestion d'aliments (très peu) contaminés, leurs effets sanitaires sont réduits en raison du boycott et des contremesures agricoles. Ils demeurent toutefois non négligeables¹² comme indiqué au Tableau A4.3.4 :

Tableau A4.3.4 : Effets sanitaires à long terme (ingestion)

Ingestion			
	Nombre de cas	M€/cas	M€
Cancers mortels	4 167	0,909	3 788
Autres cancers	2 629	0,091	239
Effets héréditaires	4,2%		161
Total	6 796		4 188

En revanche les effets du panache restent élevés, même avec des mesures d'urgence « optimales » ainsi que l'indique le Tableau A4.3.5 :

Tableau A4.3.5 : Effets sanitaires à long terme (panache)

Panache			
	Nombre de cas	M€/cas	M€
Cancers mortels	14 422	0,909	13 111
Autres cancers	16 760	0,091	1 524
Effets héréditaires	3,0%		392
Total	31 182		15 027

À ces nombres il faut ajouter les cancers, déjà évoqués ci-dessus, dus à l'impossibilité d'appliquer les mesures d'urgence « optimales » qui seraient au maximum de (Tableau A4.3.6) :

Tableau A4.3.6 : Sous-optimalité des mesures d'urgence

	Nombre	M€
Cancers mortels	9 998	8 998
Autres cancers	7 460	671

¹² Ces chiffres résultent de la relation linéaire sans seuil avec les coefficients de la CIPR.

Ainsi, le coût des effets sanitaires à long terme se monte à 19 milliards d'euros auxquels on pourra ajouter une valeur moyenne du surcoût de sous-optimalité des mesures d'urgence (environ 3,5 G€). Le montant reste inférieur au coût des interdictions alimentaires calculées ci-après.

III.3.4. INTERDICTIONS ALIMENTAIRES

La contamination alimentaire est considérable. Le boycott de l'alimentation contaminée est imposé par les populations. Cela ne conduit pas globalement à de graves surcoûts¹³ comme le montre la Figure A4.3.2.

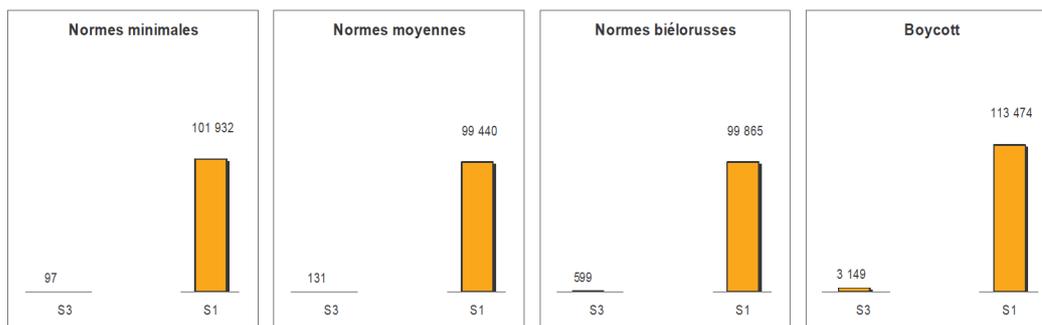


Figure A4.3.2 : Coûts radiologique total hors site pour différents niveaux de normes (M€)

En revanche, la composition du coût est modifiée avec des coûts sanitaires plus faibles et des coûts agricoles nettement plus élevés. Étant donné ce boycott, les pertes agricoles de la première année sont de 25 milliards d'euros soit 70% de la perte totale¹⁴. Cela représente un tiers de la production agricole française ce qui laisse à penser que le boycott n'est pas totalement irréaliste. La seconde année, les pertes sont réduites à 5,5 milliards d'euros environ soit 15% du coût total. Les pertes des années suivantes sont nettement plus faibles.

Au total, les coûts radiologiques hors site dans le cas de l'accident majorant sont résumés dans le Tableau A4.3.7 :

¹³ L'augmentation du coût total hors site provoqué par le boycott, par rapport à la norme biélorusse (100 Bq/kg) est d'un facteur de seulement 1,13 contre un facteur de 5 pour S3 (l'accident de référence). Par conséquent, si le boycott était impraticable ou seulement partiel (ce qui ne nous paraît pas l'hypothèse la plus réaliste), la différence de coût serait relativement faible.

¹⁴ Le code Cosyma (sans contre-mesures agricoles) calcule 100 milliards de pertes alimentaires sur plus de 10 ans, dont 80% sur les 10 premières années. Grâce aux contremesures agricoles, on estime que cette perte peut être ramenée à quelques 37 milliards d'euros dont 95% sur les 10 premières années.

Tableau A4.3.7 : Coûts radiologiques hors site

	M€
Effets sanitaires à court terme	0
Contremesures d'urgence classiques	2 639
Sous-optimalité des contremesures	3 526
Évacuations sans retour	44 550
Effets sanitaires à long terme	19 215
Interdictions alimentaires	36 662
Total	106 592

Le plus gros poste est constitué par les évacuations sans retour (44 G€), le second par les interdictions alimentaires (37 G€). Ce coût est 34 fois plus élevé que le coût correspondant pour l'accident de référence S3.

III.4. COÛTS RELATIFS AUX TERRITOIRES CONTAMINÉS

L'accident produit une vaste contamination, notamment en césium 137, contamination durable et pénalisante quand elle est élevée. Une contamination moins extrême pourrait advenir, par exemple dans le cadre de l'accident de référence S3, suite à une défaillance de la filtration ou une défaillance limitée de l'enceinte¹⁵. Examinons d'abord ce scénario (appelé ici S3D) pour comprendre la logique de l'estimation de coût sur un cas moins extrême que le scénario majorant S1. Cette logique sera ensuite appliquée au scénario majorant.

III.4.1. SCÉNARIO S3D

Dans ce cas, la répartition de la contamination apparaît dans le Tableau A4.3.8 :

Tableau A4.3.8 : Répartition de la contamination (km², scénario S3D)

	1 à 5 Ci/km ²	5 à 15 Ci/km ²	15 à 40 Ci/km ²	plus de 40 Ci/km ²
Surface moyenne (km²)	1 780	144	16	4

Pour aboutir à ces chiffres, 30 séquences prises parmi les 144 de l'étude probabiliste ont été calculées individuellement pour en faire la carte des dépôts. Elles sont réparties tout au long de l'année par un tirage au 1/5^{ème} dans les 144 séquences de Cosyma (en effet, le code ne fournit pas directement les surfaces contaminées dans ses calculs probabilistes ; il ne le fait que pour le calcul d'une seule séquence accidentelle).

¹⁵ Nous utilisons pour ce faire le terme source de l'accident S3 tel qu'il était utilisé avant sa réévaluation autour de 2000. Ce terme source comporte environ 100 fois plus de rejets en césium 137.

Les chiffres cités sont les médianes issues de cet échantillon. Les moyennes, nettement plus élevées, ne sont pas pertinentes pour le scénario de base en raison du rôle excessif qu'elles font jouer aux cas extrêmes.

Dans ce scénario, les normes appliquées en Biélorussie sont adoptées après l'accident si bien que les territoires contaminés au-delà de 15 Ci/km² (555 kBq/m²) sont déclarés zones d'exclusion et que les territoires contaminés entre 1 et 15 Ci/km² bénéficient d'aides diverses. Les surfaces concernées dans ce scénario sont donc (Tableau A4.3.9) :

Tableau A4.3.9 : Zones d'exclusion et zones contaminées (scénario S3D)

	Activité surfacique en césium 137	Surfaces (km ²)
Territoires soustraits à la production	supérieure à 555 kBq/m ²	20
Territoires bénéficiant d'aides	entre 37 kBq/m ² et 555 kBq/m ²	1 924

Nous estimons la valeur de la zone d'exclusion à quelques 10 M€/km² (au-delà de l'indemnisation de l'évacuation/réinstallation). Le coût de la zone d'exclusion est alors de 200 M€, un coût qui reste relativement faible. S'agissant des zones aidées, l'étude s'est basée sur un retour d'expérience, celui de la Biélorussie. Ce dernier a été spécifiquement étudié par le CEPN et se traduit par les aides suivantes (Tableau A4.3.10) :

Tableau A4.3.10 : Aides dans les zones contaminées

	Coûts unitaires	
Solidarité	2 000 € par ha	66%
Soutien aux exploitations agricoles	650 € par ha	21%
Coût environnemental	375 € par ha	12%
Total		100%

Source : CEPN, Note NTE/06/28, pour les coûts unitaires

<p><u>Solidarité</u></p> <p>+ dépenses de santé supplémentaires, + primes de risque et autres avantages aux fonctionnaires et aux salariés, + actions spécifiques à l'intention des enfants, etc.</p> <p>Le coût unitaire est basé sur 1 800 € par personne et par an ou encore 150 € par personne et par mois. Avec une densité de 110 h/km², probablement correcte pour le scénario S3D, mais probablement sous-estimée pour un scénario S1.</p>
<p><u>Soutien aux exploitations agricoles</u></p> <p>À titre de comparaison, le soutien total à l'agriculture serait de 20 à 25 milliards d'euros par an, en France. Voir http://www.oecd.org/document/55/0,2340,fr_2649_33775_36965703_1_1_1_1,00.html, où la moyenne OCDE est de 32% de la production sachant que la production agricole française était de 72 milliards d'euros en 2005.</p>
<p><u>Gestion de l'environnement</u></p> <p>+ décontamination et gestion des déchets + suivi de la contamination de l'environnement + mesures d'assainissement des eaux, des forêts, des ressources minérales (carrières, sables, graviers) et pertes de production correspondantes</p>

Avec ces chiffres, le coût annuel des territoires bénéficiant d'aides est de (Tableau A4.3.11) :

Tableau A4.3.11 : Coût annuel des territoires bénéficiant d'aides

Coût annuel	%	M€
Solidarité	66%	385
Soutien aux exploitations agricoles	21%	125
Coût environnemental	12%	72
Total	100%	582

Ces montants sont aisément supportables par le budget de la France. Leur prolongation sur de nombreuses années représente, toutefois, un fardeau certain comme l'indique le Tableau A4.3.12 qui donne différents coûts actualisés :

Tableau A4.3.12 : Coût total actualisé des territoires bénéficiant d'aides

Coûts actualisés	M€
sur 30 ans, actualisés à 4%	10 064
sur 30 années supplémentaires, à taux décroissant	4 019
sur 30 années supplémentaires, à taux décroissant	2 219

Source pour le taux d'actualisation : Rapport Lebègue, "Le prix du temps et la décision publique", La Documentation Française, 2005

En réalité, ces subventions devraient décroître avec le temps. Mais comment ? Baisseraient-elles comme la décroissance radioactive du césium 137 ? Simpliste, tant le sujet est politique et symbolique. Pour rester simple, les coûts de la première ligne de ce tableau donnent une évaluation de l'ordre de grandeur du coût social. Cet ordre de grandeur n'est pas une prospective des indemnités qui pourraient être réellement versées.

Au total, le coût des territoires contaminés, pour un scénario S3D, serait de l'ordre de 10 milliards d'euros comme indiqué au Tableau A4.3.13 :

Tableau A4.3.13 : Coût total des territoires contaminés (scénario S3D)

	Activité en Cs 137 (kBq/m ²)	M€
Territoires soustraits à la production	supérieure à 555	200
Aides actualisées sur 30 ans	entre 37 et 555	10 064
Ensemble		10 264

Ce coût est de l'ordre du coût radiologique hors site. Il est élevé, mais il n'est pas insupportable. Il suggère qu'il faudrait approfondir la politique à suivre en matière d'indemnisation des zones moyennement contaminées afin de limiter son coût et de minimiser le coût social, en clair la souffrance des personnes concernées.

III.4.2. L'ACCIDENT MAJORANT

Dans le cas de l'accident majorant, les surfaces concernées figurent dans le Tableau A4.3.14. Elles sont d'une tout autre ampleur :

Tableau A4.3.14 : Répartition des surfaces contaminées (accident majorant, cas de base)

	1 à 5 Ci/km ²	5 à 15 Ci/km ²	15 à 40 Ci/km ²	plus de 40 Ci/km ²	plus de 15 Ci/km ²
Surface moyenne (km²)	35 544	13 594	7 996	6 070	13 575

Source : Sondage sur 30 séquences déterministes

La surface des zones aidées est multipliée par 25, celle de la zone d'exclusion par 700...¹⁶ Les zones aidées couvrent en moyenne près de 50 000 km² soit 9% de la superficie de la France (552 000 km²), les zones d'exclusion près de 2,5%.

S'agissant des aides, elles se montent à quelques 15 milliards d'euros par an comme l'indique le Tableau A4.3.15, une somme considérable, qui ne serait peut être pas déboursée en réalité, mais qui estime le coût social correspondant.

Tableau A4.3.15 : Coût annuel des territoires bénéficiant d'aides

Coût annuel	%	M€
Solidarité	66%	9 828
Soutien aux exploitations agricoles	21%	3 194
Coût environnemental	12%	1 843
Total	100%	14 864

À partir de là, les mêmes calculs que ceux effectués ci-dessus pour le cas S3D donnent les coûts figurant dans le Tableau A4.3.16 :

Tableau A4.3.16 : Coût total des territoires contaminés (accident majorant, cas de base)

	Activité en Cs 137	M€
Territoires soustraits à la production	supérieure à 555 kBq/m ²	135 750
Aides actualisées sur 30 ans	entre 37 kBq/m ² et 555 kBq/m ²	257 033
Ensemble		392 783

L'ampleur de la question des territoires contaminés apparaît en pleine lumière. De même que les 55 milliards d'euros des évacuations elles-mêmes ne sont pas nécessairement versés aux victimes, les 135 milliards d'euros que représente ici la perte des zones d'exclusion ne sont pas nécessairement déboursés. Ils évaluent seulement le coût social pour les victimes concernées.

Ce coût des territoires contaminés devient le poste nettement dominant des coûts de l'accident majorant et donne à cet accident un caractère tout à fait différent de l'accident de référence S3.

¹⁶ Ces surfaces élevées ne sont probablement pas surévaluées par rapport au modèle, mais plutôt sous-évaluées. En effet, le code donne des répartitions de probabilité qui montrent que notre sondage de 30 séquences ne contient pas les séquences les plus graves (problème des queues de distribution). En revanche, le code ne considère aucun relief, donc aucun obstacle, ce qui amène des surestimations.

III.4.3. LES ZONES URBAINES

Les coûts qui précèdent sont immenses. Mais ils ne prennent en compte que les zones rurales. Si par malheur le panache radioactif venait à frapper durement une zone urbaine, les surfaces ci-dessus ne seraient pas modifiées, mais le nombre des victimes affectées serait beaucoup plus grand. En outre, en raison du rôle de plaque tournante des villes dans l'activité économique, il faudrait analyser beaucoup plus finement les répercussions de la contamination sur l'activité elle-même, y compris les transports et l'industrie ; on ne pourrait plus se contenter d'un raisonnement basé sur les surfaces atteintes. Dans l'une des 144 séquences calculées par le code (et tirée au hasard pour en faire la carte), toute la région parisienne est contaminée au-delà de 40 Ci/km²...

Autrement dit, ces coûts immenses sont très sous-évalués dans les cas les plus défavorables et donc sous-évalués en moyenne, un point qu'il conviendrait d'approfondir.

III.5. COÛT D'IMAGE

III.5.1. EXPORTATIONS AGRO-ALIMENTAIRES

L'effet médiatique d'un tel accident est évidemment dévastateur et la baisse des exportations agro-alimentaires est très forte dans tous les cas, même si la gestion de crise est optimale. Dans le scénario retenu pour l'accident de référence S3, la gestion de crise est supposée parfaite (ce qui est certes optimiste) et, en conséquence, le coût d'image est relativement faible. Dans le présent scénario, la gestion de crise de l'accident majorant ne parvient pas à empêcher une baisse forte de la demande extérieure de produits agro-alimentaires français, aussi bien qu'une baisse forte du tourisme et des autres exportations.

Le Tableau A4.3.17 indique la perte économique (valeur ajoutée) ; elle se répartit sur trois ans :

Tableau A4.3.17 : Coût d'image, exportations agro-alimentaires

Années	%	G€
1	50%	6
2	33%	4
3	16%	2
Total		12

Ce scénario n'est pas totalement enveloppe. Certes une baisse de moitié des exportations est une baisse très forte, mais des baisses encore plus élevées ne peuvent pas être totalement exclues. Par ailleurs, la contamination demeurant, l'effet médiatique n'est pas susceptible de disparaître. On peut donc concevoir une baisse plus durable, par exemple 1 G€ de perte de l'année 4 à, par exemple, l'année 10, voire au-delà.

III.5.2. TOURISME

Comme dans le cas de l'accident de référence S3, l'effet d'image sur l'activité touristique diffère selon l'origine du tourisme. L'ordre de grandeur de la perte est de 21 milliards d'euros qui se répartissent schématiquement comme indiqué dans le Tableau A4.3.18 :

Tableau A4.3.18 : Coût d'image, réductions de l'activité touristique

Années	Tourisme national		Tourisme européen proche		Tourisme international lointain		Total G€
	%	G€	%	G€	%	G€	
1	20%	2,8	50%	4,2	100%	5,6	12,6
2	10%	1,4	30%	2,5	50%	2,8	6,7
3	0%	0	10%	0,8	20%	1,1	2,0
Total		4,2		7,6		9,5	21,3

Cet effet peut sembler faible, notamment avec 50% seulement de baisse du tourisme européen proche et 20% de baisse du tourisme national la première année (ces chiffres, en effet, sont schématiques ; ils permettent de dégager un ordre de grandeur). Une baisse nettement plus forte ne paraît, toutefois, guère probable sachant qu'un accident à Dampierre, même de grande ampleur, est peu susceptible de contaminer les régions touristiques côtières, notamment la Côte d'Azur, régions qui constituent une forte part de l'activité touristique¹⁷.

III.5.3. AUTRES EXPORTATIONS

Les autres exportations sont nettement plus touchées que dans le cas de l'accident de référence S3. Voici la perte de valeur ajoutée correspondante :

Tableau A4.3.19 : Coût d'image, autres exportations

Années	%	G€
1	10%	11
2	6%	7
3	3%	3
Total		22

Elles pourraient l'être plus encore. Ce poste mériterait d'être approfondi compte tenu de son poids dans l'effet d'image.

¹⁷ On pourrait aussi objecter que la baisse de tourisme national n'est pas une baisse de demande extérieure et que des effets de substitution sont probables, la dépense touristique se reportant sur d'autres dépenses. Mais on peut aussi interpréter la baisse indiquée comme un transfert du tourisme national vers du tourisme à l'étranger, notamment proche, la perte étant alors non compensée.

III.5.4. LE COÛT D'IMAGE TOTAL

Le coût d'image total comporte les coûts directs qui viennent d'être évoqués augmentés de leurs effets indirects. Ceux-ci sont calculés de la même façon que pour un effet d'image moins conséquent par application des coefficients de propagation dans l'économie d'un effet direct unitaire (Tableau A4.2.8). Au total, l'ensemble se résume comme indiqué au Tableau A4.3.20 :

Tableau A4.3.20 : Coût d'image total (accident majorant)

Coût d'image	G€
Exportations agricoles	12
Tourisme	21
Autres exportations	22
Effets indirects	74
Total (arrondi)	130

L'effet d'image est donc considérable, environ 5 fois plus important que pour l'accident de référence S3. Néanmoins, il ne semble pas être surestimé, et ce pour les raisons suivantes :

1. le poste « Autres exportations » est susceptible d'être plus élevé ;
2. les baisses d'exportations ont été considérées sur trois ans, mais il est possible qu'elles se prolongent au-delà, notamment parce que la contamination des territoires fera parler d'elle pendant longtemps, les médias revenant régulièrement sur le sujet, notamment à l'occasion des dates anniversaires, mais aussi dans des sujets plus approfondis du type journalisme d'investigation ;
3. enfin, d'autres effets d'image purement économiques pourraient jouer un rôle non négligeable, par exemple : baisse des investissements étrangers en France, baisse de la Bourse provoquant une baisse de consommation, etc.

Par ailleurs, des effets d'image non purement économiques, tels que la baisse de prestige de la France au plan mondial, pourraient avoir des conséquences économiques.

III.6. EFFETS SUR LE PARC

Dans ce scénario, l'effet sur le parc touche l'ensemble des REP dont la durée de vie est ramenée de 40 ans à 30 ans. L'augmentation de coût est très nette, par rapport à la seule réduction de durée de vie des 900 MWe, notamment parce que les réacteurs de 1300 MWe et 1450 MWe produisent plus et sont plus jeunes. La Figure A4.3.3 présente le coût de cette réduction de durée de vie selon l'année de l'accident :



Figure A4.3.3 : Coût en milliards d'euros de la réduction de la durée de vie de tous les réacteurs nucléaires, de 40 ans à 30 ans, en fonction de la date de l'accident¹⁸.

On retient une valeur moyenne de 90 G€ pour l'effet sur le parc. Dans les huit premières années de cette courbe, le parc hors 900 MWe enregistre une perte de 77 G€ de profits non réalisés. Ces chiffres offrent une première estimation simple de l'ordre de grandeur des effets de l'accident sur le parc dans le cas de l'accident majorant S1, estimation cohérente avec celle de l'accident de référence S3. Ils négligent les perspectives d'exportation de l'industrie nucléaire française dans un contexte éventuel de renaissance du nucléaire.

¹⁸ L'accident survient au Blayais, centrale moyenne au sein du programme de construction des 900 MWe.

III.7. EFFETS INDIRECTS

Le présent scénario considère que la baisse de production agricole la première année ne peut pas être compensée par la production nationale. On considère de façon simplifiée qu'elle n'est *aucunement* compensée la première année, mais qu'elle est ensuite totalement compensée. L'effet négatif dû à cette perturbation de 25 G€ (production agricole perdue la première année) vaut 37 G€ (voir Tableau A4.2.8 pour l'effet indirect des productions agricoles).

L'effet négatif de l'accident sur l'économie des régions touchées est indéniable. La baisse de production dans les zones d'exclusion ainsi que sur les zones moyennement contaminées est nette (elle est prise en compte dans les coûts des territoires concernés). Dans ce contexte, le chantier de nettoyage sur site a un faible effet compensatoire. Les effets négatifs indirects sont compensés par l'effet de relance de la réinstallation des évacués et par les travaux effectués dans les zones aidées. Les subsides distribués dans ces zones vont aussi dans ce sens, même si ces subsides ne sont pas à la hauteur du détriment subi. Confrontées à de grandes difficultés financières, les autorités (peut-être renouvelées après des mouvements politiques de grande ampleur) doivent prendre des décisions très fortes de relance économique régionale et nationale. Par souci de simplification, on ne retient pas d'effet indirect négatif.

Le remplacement anticipé du parc a un effet d'entraînement double du remplacement des seuls 900 MWe. On retient le chiffre de 6 milliards d'euros.

Un effet de déprime générale est probable, comme lorsque la baisse de moral des patrons entraîne le report des investissements productifs. Ce sujet mériterait d'être approfondi dans l'optique de la gestion de crise, car les montants correspondants pourraient représenter un enjeu conséquent. Dans le cadre simplifié des présentes estimations, nous ne sommes pas en mesure d'estimer les déterminants de cet effet ni d'en proposer une quantification

L'effet indirect total est donc de quelques 31 G€ dont l'essentiel a lieu sur les 4 premières années. Cet effet paraît colossal, mais il ne couvre pas la baisse de moral évoquée ci-dessus – qui pourrait avoir des effets de grande ampleur.

III.8. LE COÛT TOTAL DE L'ACCIDENT MAJORANT

Le Tableau A4. suivant reprend les estimations détaillées ci-dessus :

Tableau A4.3.21 : Coût total (accident majorant, cas de base)

	Milliards d'€
Coûts sur site	10
Nettoyage	4,5
Remplacement	5,0
Autres	0,5
Coûts radiologiques hors site	107
Effets sanitaires à court terme	0
Contremesures d'urgence optimales	2,6
Sous-optimalité des contremesures	3,5
Évacuations sans retour	44,5
Effets sanitaires à long terme	19,2
Interdictions alimentaires	36,7
Coût des territoires contaminés	393
Territoires soustraits à la production	136
Territoires bénéficiant d'aides	257
Coût d'image	130
Exportations agricoles	12
Tourisme	21
Autres exportations	22
Effets indirects	74
Effets sur le parc	90
10 ans de vie en moins sur les REP	90
Effets indirects	31
Interdictions alimentaires	37
Remplacement du parc 900 MWe	-6
Total (arrondi)	760

Cette somme énorme représente environ 45 points de PIB et quelques 19 années de croissance française ! Si l'accident de référence S3 faisait passer l'accident technologique au rang de catastrophe naturelle de grande ampleur, l'accident majorant S1 l'amène au niveau des plus grandes catastrophes géopolitiques.

La structure des coûts apparaît dans le Tableau A4.3.22 :

Tableau A4.3.22 : Structure des coûts (accident majorant, cas de base)

Coûts sur site	1%
Coûts radiologiques hors site	14%
Territoires contaminés	52%
Coût d'image	17%
Effet sur le parc	12%
Effets indirects	4%
Total arrondi	100%

Au contraire de l'accident de référence S3, cet accident marquerait toute la population pendant au moins une génération la confrontant à des défis majeurs. Les conséquences sont tellement considérables qu'il est difficile de prévoir l'évolution d'un pays confronté à un tel désastre.

IV. VARIABILITÉ

Les deux chapitres précédents estiment les coûts du scénario de base retenu pour l'accident de référence S3 et l'accident majorant S1. Le présent chapitre examine les variations possibles des coûts dans d'autres scénarios, notamment un scénario nettement favorable et un scénario nettement défavorable. Les paramètres varient et, par conséquent, le coût de l'accident varie. On peut ainsi repérer la plage de variation du coût et les paramètres les plus critiques de ce point de vue.

IV.1. L'ACCIDENT DE RÉFÉRENCE S3

Le scénario retenu pour l'accident de référence S3 aboutit à un coût total de 70 milliards d'euros essentiellement constitués de l'effet sur le parc (35 G€) et du coût d'image (27 G€). Un cumul de conditions favorables ou défavorables pourrait conduire à des valeurs de 40 G€ et 200 G€ soit un rapport de 1 à 5. Ces deux valeurs extrêmes ne sont pas des limites absolues, mais plutôt des ordres de grandeur des centiles 5% et 95% de la distribution du coût. Elles permettent de mieux situer la valeur de 70 G€ proposée comme estimation du scénario probable. Ces valeurs extrêmes sont établies comme suit.

Le scénario favorable, à 40 milliards d'euros, est le suivant :

- l'accident se produit vers la fin de vie du parc des 900 MWe. L'effet sur le parc est donc faible, peu de réacteurs étant concernés. Le coût de remplacement de l'énergie non produite sur le site est également faible. L'effet parc peut ainsi descendre à 10 milliards d'euros (voire moins) et le coût sur site à 4 milliards d'euros, l'ensemble représentant une baisse de coût de 27 milliards ;
- la population accepte l'application des normes minimales en cas d'accident. Le coût radiologique hors site descend en-dessous 100 M€ pour devenir presque négligeable. Le coût est réduit de 3 milliards d'euros supplémentaires ;
- le coût d'image étant déjà minimal dans le scénario de base, il ne peut pas être significativement réduit.

À l'opposé, le scénario défavorable correspond à un coût très élevé :

- la durée de vie des réacteurs a été prolongée à 60 ans et l'accident se produit à une date tardive. La date étant tardive, l'augmentation du prix du gaz (toujours à 5% par an) rend le remplacement de l'électricité nucléaire par la filière gaz nettement plus coûteux. Si, malgré la date tardive de l'accident, tous les 900 MWe sont encore pleinement touchés, perdant tous 10 ans de durée de vie (vers 2028), on conçoit que le coût de remplacement soit nettement plus élevé. L'effet parc est alors d'environ 120 G€. Cette somme colossale pourrait encore être plus élevée si les prix du gaz s'envolaient encore plus ou si la puissance publique décidait d'une réduction de 15 ou 20 ans de la durée de vie des réacteurs 900 MWe. Ce scénario n'est donc pas le plus pénalisant ;
- l'effet d'image est plus fort que dans le cas de base : la réduction des exportations agricoles est deux fois plus importante, la réduction du tourisme et des autres exportations est trois fois plus grande. Au total, avec les effets indirects, le coût d'image se monte alors à 74 milliards d'euros. Cet effet d'image est considérable, mais il pourrait être encore plus élevé si d'autres effets d'image, comme une baisse des investissements étrangers, étaient significatifs ;

- les coûts de nettoyage et de démantèlement sont supérieurs de 50% à ceux qui ont été estimés et le prix du gaz augmente plus rapidement que prévu. Le coût sur site monte alors à 12 G€ ;
- enfin, les conditions météorologiques sont défavorables (centile 95% de la distribution) entraînant des coûts radiologiques environ doubles de ceux du scénario de base.

Ce scénario pénalisant dépasse les 200 milliards d'euros, soit près de trois fois plus que le scénario de base. Cette rapide analyse de variabilité est résumée dans le Tableau A4.41 :

Tableau A4.4.1 : Sensibilité du coût de l'accident de référence

	Base	Cas favorable		Cas pénalisant	
	G€	G€	commentaire	G€	commentaire
Coûts sur site	7,0	4		12	
Nettoyage	3,6	2,7	-25%	5,4	+50%
Remplacement	2,9	1,0	accident tardif	6,0	prix du gaz élevé
Autres	0,5	0,3	-50%	0,5	+25%
Coûts radiologiques hors site	3,1	0		6	
Effets sanitaires à long terme	0,1	89 M€	normes minimales	0,2	météo défavorable
Interdictions alimentaires	3,1	8 M€	normes minimales	6,2	météo défavorable
Coût d'image	27	27		74	
Exportations agricoles	3	3		6	+100%
Tourisme	3	3		9	+200%
Autres exportations	5	5		15	+200%
Effets indirects	16	16		44	
Effets sur le parc	35	10	accident tardif	120	60 ans pour les 900 MWe, accident vers 2028
Effets indirects	-3	-1		-6	
Total arrondi	70	40		205	

Le poste le plus sensible est l'effet sur le parc sur lequel il convient de s'arrêter :

- nous avons utilisé une approche simple – la durée de vie des 900 MWe passe de 40 ans à 30 ans (dans le cas de base, de 60 à 50 ans dans un cas pénalisant). Elle permet de mettre en évidence le rôle crucial de ce poste. Elle ne permet pas d'en comprendre le mécanisme. Une étude approfondie devrait envisager d'autres scénarios d'effet parc et d'autres scénarios d'accident (par exemple : des accidents moins graves, des accidents survenant hors de France...). Elle devrait dégager les grands déterminants de ce poste de coût et indiquer comment le réduire autant que possible ;
- nous n'avons pas pris en compte, dans cet effet parc, les possibles répercussions d'un accident sur l'effet de serre. Une étude approfondie devrait envisager cet aspect et comparer plusieurs solutions de remplacement du parc actuel ce qui dépassait le cadre de la présente étude. Il est néanmoins possible d'estimer que, dans un remplacement du nucléaire par le cycle combiné au

gaz, les coûts du carbone pourraient représenter un tiers des coûts hors effets de serre¹⁹. Cela impliquerait +10 G€ soit +15% du coût total ;

- prendre 10 G€ comme valeur basse de ce poste paraît raisonnable, de façon générale. L'interprétation étroite proposée ci-dessus (la réduction de la durée de vie reste la même mais peu de réacteurs sont touchés, car l'accident se produit en fin de vie de ce parc) n'est pas forcément la plus réaliste ;
- en revanche, il demeure certain que la prolongation de la durée de vie du parc existant induirait une plus grande vulnérabilité sur ce poste, c'est-à-dire une plus grande vulnérabilité de l'électricité française ;
- nous nous plaçons dans une perspective nationale. L'accident aurait des répercussions internationales que nous ne prenons pas en compte mais qui seraient bien réelles.

L'effet parc n'est donc pas un enjeu limité à la gestion de crise au sens classique. Il peut probablement, en effet, être réduit préventivement par diverses mesures. Il peut, surtout, être aggravé par l'extension de la durée de vie des réacteurs. Il reste, évidemment, un enjeu essentiellement politique après un possible accident.

Le coût d'image est aussi un poste de coût sensible et c'est un véritable enjeu, proche de 50 G€. C'est dire l'importance de la gestion de crise dans ce domaine.

En revanche, les coûts radiologiques hors site ne sont pas très sensibles : les conditions météorologiques ne jouent pas un rôle essentiel (+ 3 G€ dans un cas très défavorable) et il nous semble peu réaliste d'espérer que les populations et les distributeurs acceptent les normes minimales (qui feraient baisser le coût de 3 G€).

Cette analyse tend à montrer que l'estimation de 70 G€, loin d'être surévaluée, est plutôt modeste. Dans un cas défavorable, les coûts pourraient être trois fois plus élevés.

¹⁹ Cette estimation se base sur des émissions de 0,43 t de carbone par MWh et sur un coût de 20 €/t en 2010, augmentant de 5% par an.

IV.2. L'ACCIDENT MAJORANT S1

Le scénario retenu pour l'accident majorant aboutit à un coût total de 760 milliards d'euros essentiellement constitués par le coût des territoires contaminés (environ 400 G€) et le coût d'image (130 G€).

IV.2.1. VARIABILITÉ DE LA CONTAMINATION

C'est donc une faible contamination du territoire qui peut alléger sensiblement le coût de cet accident. Ce cas est possible, en fonction de la météo. La répartition des surfaces contaminées que fournit l'analyse de 30 séquences accidentelles est indiquée Figure A4.4.1 :

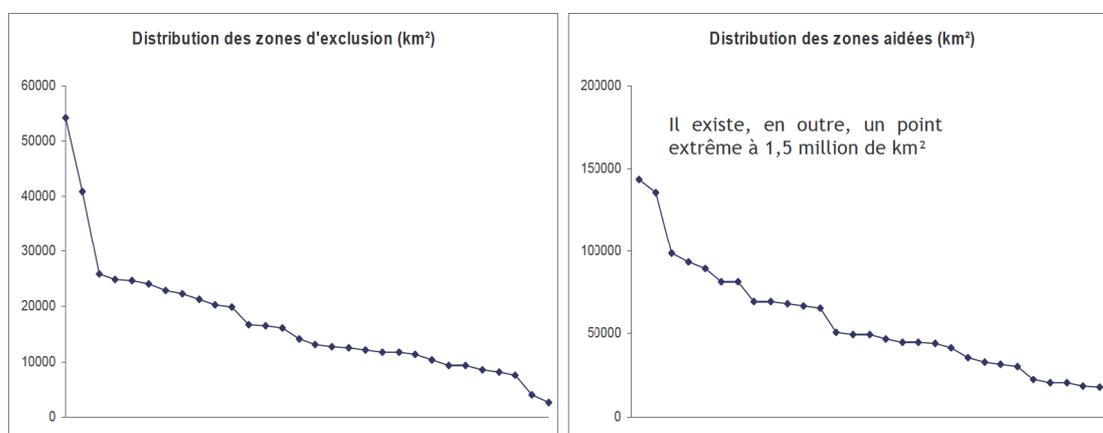


Figure A4.4.1 : Distribution des surfaces contaminées

Les valeurs numériques qui correspondent aux centiles 5% et 95% de la distribution et que l'on peut retenir pour évaluer la sensibilité du phénomène figurent dans le Tableau A4.4.2 :

Tableau A4.4.2 : Répartition des surfaces contaminées (accident majorant)

	Activité en Cs 137 (en kBq/m ²)	Surfaces (km ²)		
		Médiane	Cas favorable	Cas pénalisant
Zones d'exclusion	supérieure à 555	13 575	3 000	47 500
Territoires contaminés	entre 37 et 555	49 138	19 500	840 000
	entre 37 et 185	35 544	15 500	817 000
	entre 185 et 555	13 594	4 000	23 000

Le cas favorable est environ le centile 5% de la distribution, le cas défavorable, le centile 95%.

Un facteur de 16 sépare le cas pénalisant du cas favorable, pour ce qui est des zones d'exclusion ; ce facteur passe à 42 pour les autres zones contaminées. Le phénomène de queue de distribution apparaît clairement, même s'il est plutôt sous évalué par un sondage aléatoire comme celui proposé. Cette grande sensibilité de la contamination aux conditions météorologiques se traduit par les variations de coût suivantes (Tableau A4.4.3) :

Tableau A4.4.3 : Coût des surfaces contaminées (accident majorant)

	Activité du césium 137	Coûts (milliards d'euros)		
		Cas de base	Cas favorable	Cas pénalisant
Zones d'exclusion	supérieure à 555 kBq/m ²	136	30	475
Zones aidées	entre 37 kBq/m ² et 555 kBq/m ²	257	100	4 400
	<i>entre 37 kBq/m² et 185 kBq/m²</i>	<i>186</i>	<i>80</i>	<i>4 280</i>
	<i>entre 185 kBq/m² et 555 kBq/m²</i>	<i>71</i>	<i>20</i>	<i>120</i>

Au total, le coût des territoires contaminés, estimé à environ 400 G€ dans le cas de base, varie entre 130 G€ et 4 875 G€ soit un rapport de 1 à 37. Par rapport au cas de base, ces variations représentent une division par 3 et une multiplication par 12. C'est de l'étendue de la contamination, donc des conditions météorologiques, que provient l'essentiel de la variabilité du coût de l'accident majorant. Les cas extrêmes défavorables sont particulièrement redoutables.

IV.2.2. CAS FAVORABLE

Dans des conditions météorologiques favorables au moment de l'accident, le coût des territoires contaminés n'est plus que de 130 G€ soit environ 260 G€ de moins (-34%) que dans le cas de base. En outre, le coût des évacuations hors des zones d'exclusion est nettement réduit, le nombre de réfugiés baissant de 1,5 millions à quelques 330 000. Le coût correspondant passe de 55 G€ à 10 G€ environ soit une économie supplémentaire de 45 G€ (-6%). Une météo favorable ferait donc baisser le coût de l'accident de 40%.

Le coût radiologique hors site peut également être réduit si les populations acceptent les normes biélorusses, ce qui n'est pas irréaliste dans le contexte catastrophique de l'accident majorant. Dans ces conditions, les coûts sanitaires et les coûts des interdictions alimentaires passent de 56 G€ à 22 G€ soit une économie supplémentaire de 34 G€.

La grande majorité de ce qui vient d'être évoqué ne dépend pas de la gestion de crise, mais des conditions climatiques.

Un poste important sur lequel la gestion de crise peut agir, c'est l'effet d'image. Dans le cas de base, le coût cumulé de la baisse de demande extérieure est estimé à 130 G€. Une gestion de crise efficace dans ce domaine devrait pouvoir faire diminuer ce coût. Dans un cas favorable, le coût d'image pourrait

descendre à 75 G€ sous l'effet combiné de réductions moitié moindres pour les exportations agricoles et pour les autres exportations et 25% moindre pour l'activité touristique. L'économie correspondante est de 55 G€.

Comme dans le cas de l'accident de référence S3, l'effet sur le parc est réduit si l'accident se produit vers la fin de la durée de vie de ce parc. Le coût pourrait ainsi passer de 90 G€ à 30 G€, voire moins, si l'accident survenait nettement après 2025.

Le coût sur site pourrait aussi être réduit dans le cas d'un accident tardif.

Au total, les hypothèses favorables évoquées ci-dessus se résument par le Tableau A4.4.4 suivant qui fait ressortir un coût global d'environ 300 milliards d'euros soit -60% par rapport au cas de base.

Tableau A4.4.4 : Coût total du cas favorable (accident majorant)

	Base	Cas favorable	
	G€		commentaire
Coûts sur site	10	5	
Nettoyage	4,5	3,4	-25%
Remplacement	5,0	1,0	accident tardif
Autres	0,5	0,4	-25%
Coûts radiologiques hors site	106	38	
Effets sanitaires à court terme	0,0	0,0	
Contremesures d'urgence classiques	2,6	2,6	
Sous-optimalité des contremesures	3,5	3,5	
Évacuations sans retour	44,5	11	zone d'exclusion réduite
Effets sanitaires à long terme	19	10	météo favorable + normes
Interdictions alimentaires	37	11	biélorusses acceptées
Coût des territoires contaminés	393	130	
Territoires soustraits à la production	136	30	zone d'exclusion réduite (météo)
Territoires bénéficiant d'aides	257	100	zone contaminée réduite (météo)
Coût d'image	130	75	
Exportations agricoles	12	6	-50%
Tourisme	21	16	-25%
Autres exportations	22	11	-50%
Effets indirects	74	42	
Effets sur le parc	90	30	
idem sur tous les réacteurs français	90	30	accident tardif, effet nul sur le parc de remplacement des 900 MWe
Effets indirects	31	9,0	
effet parc	-6	-2	
interdictions alimentaires	37	11	
Total	760	287	
Total arrondi	760	300	

IV.2.3. CAS DÉFAVORABLE

Les conditions météorologiques très défavorables font que la contamination est beaucoup plus étendue que dans le scénario de base. Les zones d'exclusion sont 3,5 fois plus étendues et les autres surfaces contaminées sont multipliées par 17. Le coût des zones d'exclusion est donc multiplié par 3,5 ainsi que le coût de l'évacuation et de la réinstallation des victimes. Le coût de la contamination est multiplié par 17. En réalité, plus les surfaces contaminées sont étendues, plus la probabilité de toucher une zone urbaine est grande. Par conséquent les évaluations proposées, hors zones urbaines, sont d'autant plus sous-estimées. Le coût total de la contamination approche alors 5 000 milliards d'euros...

Ce coût social astronomique est dû au grand nombre de victimes. En appliquant aux surfaces calculées par le code les densités de population rurales autour de Dampierre, on évalue à plus de 5 millions le nombre de réfugiés des zones d'exclusion, à environ 2,5 millions les personnes en zones fortement contaminées et à 90 millions les personnes habitant des zones moins fortement contaminées. Ces chiffres indicatifs du scénario du pire montrent qu'un bon nombre de victimes seraient situées hors de France.

Compte tenu de l'importance cruciale du phénomène de contamination, il est nécessaire de confirmer ces grandeurs par des études plus précises avec des modèles de diffusion plus modernes et surtout, avec une gamme plus réaliste de termes source. Il faut rester prudent sur ces estimations très élevées.

Autres conditions défavorables, la durée de vie des centrales est prolongée à 60 ans et l'accident se produit vers les années 2028. Comme pour l'accident S3, tous les REP sont entièrement atteints par une baisse de 10 ans de leur durée de vie et les coûts de remplacement sont environ trois fois plus élevés qu'en 2006. Le coût correspondant passe à 360 G€ (trois fois l'impact le plus élevé, voir III.6). Cela correspond à un surcoût de 270 G€ ou encore à une multiplication par quatre de l'effet parc.

Enfin, les coûts sur site sont plus élevés de moitié et les coûts d'image de 35%. Cette accumulation de conditions défavorables est résumée dans le Tableau A4.4.5 suivant :

Tableau A4.4.5 : Coût total du cas défavorable (accident majorant)

	Base	Cas pénalisant	
	G€		commentaire
Coûts sur site	10	15	
Nettoyage	4,5	6,8	+50%
Remplacement	5,0	8,0	prix du gaz élevé
Autres	0,5	0,6	+25%
Coûts radiologiques hors site	106	281	
Effets sanitaires à court terme	0,0	0,0	
Contremesures d'urgence classiques	2,6	2,6	
Sous-optimalité des contremesures	3,5	3,5	
Évacuations sans retour	44,5	163	zone d'exclusion étendue
Effets sanitaires à long terme	19	38	météo défavorable
Interdictions alimentaires	37	73	météo défavorable
Coût des territoires contaminés	393	4 875	
Territoires soustraits à la production	136	475	zone d'exclusion étendue (météo)
Territoires bénéficiant d'aides	257	4400	zone contaminée étendue (météo)
Coût d'image	130	176	
Exportations agricoles	12	18	prolongation sur 10 ans
Tourisme	21	33	prolongation sur 10 ans
Autres exportations	22	25	prolongation sur 2 ans
Effets indirects	74	100	
Effets sur le parc	90	360	60 ans de vie pour les REP, accident vers 2028
idem sur tous les réacteurs français	90		
Effets indirects	31	50	
effet parc	-6	-24	
interdictions alimentaires	37	74	
Total	760	5 757	
Total arrondi	760	5 800	

Le poste le plus sensible, et de très loin, pour l'accident majorant, est le coût de la contamination. Ce n'est pas fondamentalement un enjeu de gestion de crise, car, une fois le terme source S1 fixé, l'ampleur de la contamination dépend des conditions météorologiques. Les actions que les autorités pourront mettre en œuvre dans ce domaine seront susceptibles d'indemniser partiellement les victimes, mais non de réduire le détriment subi par ces victimes et par l'ensemble de la Nation.

L'effet sur le parc est le second poste susceptible d'alourdir la facture d'un accident déjà insupportable dans le cas de base. Il conviendrait d'étudier cet aspect de façon plus approfondie.

Enfin, l'effet d'image demeure, en termes économiques, l'enjeu le plus important de gestion de la crise.

Au total, le coût de l'accident majorant S1 est beaucoup plus variable que celui de l'accident de référence S3. Les conditions météorologiques pourraient le faire baisser de moitié, mais surtout, pourraient le multiplier par un facteur voisin de 7. Le coût proposé, à 760 milliards d'euros n'est donc pas surévalué par rapport à l'aléa météorologique. Avec ce chiffre de base, nous avons suggéré que les conséquences sont tellement considérables qu'il est difficile de prévoir l'évolution d'un pays confronté à un tel désastre. C'est encore plus vrai quand on considère un cas plus grave que le scénario de base.

V. IMPLICATIONS POUR LA SÛRETÉ

V.1. L'ACCIDENT GRAVE COÛTE TRÈS CHER AU PAYS

L'accident de fusion du cœur avec rejets coûte donc, d'après les estimations présentées dans les chapitres précédents, entre 40 G€ (S3, cas favorable) et 6 000 G€ (S1, cas défavorable). Dans le cas le plus défavorable, l'accident n'est pas maîtrisé au plan technologique, se déroule avec une météo très défavorable et laisse une traînée radioactive vaste et durable sur le territoire français et européen. L'événement est historique. Il constitue un handicap considérable pour l'économie et entraîne le déclin probable de vastes régions. À l'opposé, dans le cas le plus favorable, l'accident est maîtrisé au plan technologique, au plan de ses répercussions sur la production française d'électricité et au plan de l'image exportatrice de la France.

Même dans ce cas de figure favorable, la facture reste élevée puisqu'elle vaut quelques 2% du PIB ou encore plus de 10 réacteurs EPR.

La priorité déjà accordée à la prévention des accidents graves est donc entièrement justifiée par l'analyse économique. Elle s'est traduite notamment par les exigences de sûreté imposées à l'EPR d' « éliminer en pratique » les accidents de fusion du cœur avec rejets précoces et massifs ce qui est clairement conforté par les estimations de coûts présentées ci-dessus.

V.2. LA VICTIME DE L'ACCIDENT, C'EST L'ÉCONOMIE FRANÇAISE

L'accident même grave ne sera pas aussi spectaculaire que d'autres catastrophes.

Il n'y aura probablement pas de mort immédiate en-dehors du site et peut-être pas de mort non plus sur site. Les leçons de l'accident de Tchernobyl sont probablement tirées sur ce point. On se rappelle que la majorité des morts de cet accident se trouvaient sur le site la nuit de la catastrophe. Ces victimes ont sans doute agi par héroïsme, mais aussi par ignorance, notamment les services de secours. Même dans le cas majorant, les morts dues à l'irradiation et à la contamination résultant de l'accident seront décalées dans le temps et ne seront pas décelables dans les statistiques. Avec l'accident majorant, on peut attendre 14 000 cancers mortels dus au panache avec application de contre-mesures optimales, entre 5 000 et 10 000 dus à l'impossibilité d'appliquer ces contre-mesures optimales et quelques 4 000 dus à l'ingestion de denrées très peu contaminées. Ce qui donne un total de 25 000 morts environ étalées sur de nombreuses années, soit moins de 1 000 cancers radio induits par an la plupart des années concernées. Ces chiffres se comparent à quelques 150 000 décès annuels par cancer actuellement. L'augmentation sera donc généralement inférieure à 1% de la masse des autres cancers.

Dans le cas de l'accident de référence S3, les victimes directes et visibles seront les agriculteurs touchés par le boycott des produits contaminés. Ce seront des victimes économiques plus que des victimes sanitaires²⁰. Ainsi, les coûts considérables de l'accident seront, en majorité, des coûts « diffus », répartis entre tous les agents économiques : les exportateurs, ceux dont l'activité est liée à

²⁰ Même si on peut anticiper que le système médiatique tendra à mettre en avant des agriculteurs atteints, d'une façon ou d'une autre, dans leur santé.

l'export, les consommateurs d'électricité. Et pourtant, le coût sera important. C'est l'économie française dans son ensemble qui sera la réelle victime.

Dans le scénario le plus pénalisant (S1 avec conditions météorologiques défavorables), malgré l'existence de victimes identifiables et réelles, avant tout les personnes déplacées des zones d'exclusion et celles qui continueront à vivre sur des territoires contaminés, le problème sera global, national, voire européen et mondial.

V.3. PRIORITÉ À LA PRÉVENTION DE L'ACCIDENT MAJORANT

Les estimations de coût de l'accident permettent de mieux comprendre les bénéfices de la sûreté. Elles doivent, toutefois, être utilisées avec discernement. Par exemple, un facteur de coût de 11 sépare l'accident majorant de l'accident de référence S3. On pourrait donc en déduire, de façon simpliste, que les fonds consacrés à la sûreté doivent garantir que l'accident majorant est 11 fois moins probable que l'accident de référence. Mais ce rapport de coûts passe à 29 quand on compare les scénarios défavorables de ces deux accidents. Ne faudrait-il pas plutôt prendre ce rapport en compte ?

En réalité, les deux accidents sont de nature profondément différente et résumer cette réalité par la simple comparaison de deux chiffres passe sous silence ce contre quoi la sûreté protège. Les priorités de sûreté doivent indiquer comment comparer, non pas seulement deux coûts, mais des vulnérabilités très différentes : d'un côté un avenir délicat pour le nucléaire et des années sombres pour les exportations françaises, de l'autre un marquage profond et durable d'une partie non négligeable du territoire avec des conséquences considérables.

Soulignons à nouveau que l'accident majorant est ingérable en raison de son ampleur (ampleur des coûts, mais aussi nombre de réfugiés, volumes de déchets, besoins de suivis et de mesures de la contamination, conséquences politiques nationales, conséquences internationales, etc.). En outre, contrairement à l'accident de référence S3, la solidarité nationale ne sera pas en mesure d'amortir la perturbation due à l'accident majorant S1.

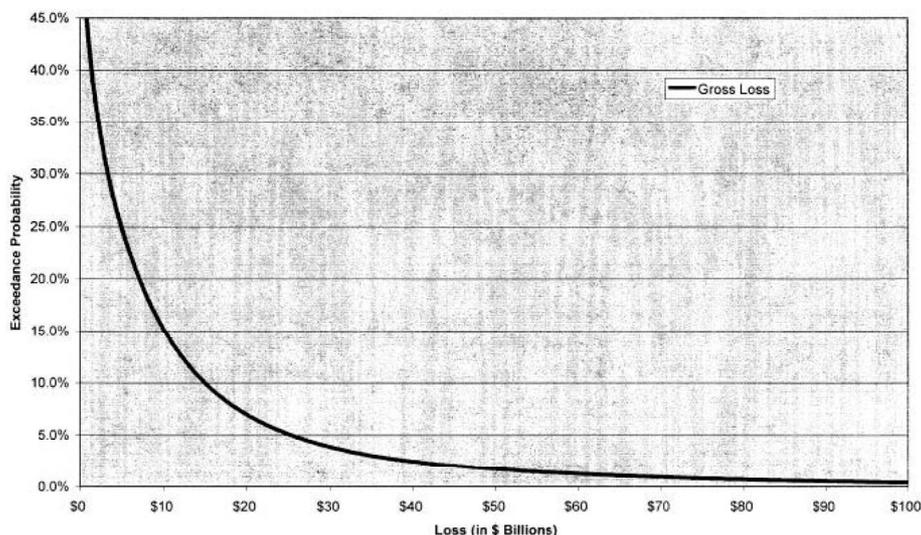
Une autre manière d'exprimer cette différence est de souligner qu'il y a le coût et l'acceptabilité du coût. Une personne privée est généralement capable d'amortir les incidents ordinaires de l'existence, par exemple des tôles froissées dans un incident de la circulation. Elle n'est souvent pas en mesure d'assumer les conséquences d'un gros accident, par exemple un grave accident de la route dont elle serait la cause. C'est pourquoi elle s'assure, même si le risque est faible et le coût de l'assurance élevé, la mutualisation entre assurés étant organisée par la compagnie d'assurance. Dans le cas du nucléaire, l'accident de référence S3 est encore supportable économiquement même s'il est lourd, mais un accident de type S1 ne l'est pas.

V.3.1. QUE FERAIT UN ASSUREUR CONFRONTÉ AU RISQUE D'ACCIDENT GRAVE ?

La comparaison avec l'assurance est intéressante dans la mesure où c'est le secteur d'activité spécialisé dans la gestion des risques en général. Voici, schématiquement, quelle serait la démarche d'un assureur :

1. établir la courbe du risque ;
2. évaluer le SMP, le sinistre maximum possible ;
3. proposer une série de tranches d'assurance.

La courbe du risque donne la répartition de probabilité des dommages. La Figure A4.5.1 en donne un exemple pour les cyclones et tornades dans le Sud-est des États-unis :



Exceedance Probability Curve for Florida (entire FHCF portfolio) for Insured Losses from Hurricanes up to \$100 Billion

Sources: Wharton Risk Center - FHCF Data 2005; simulation by RMS

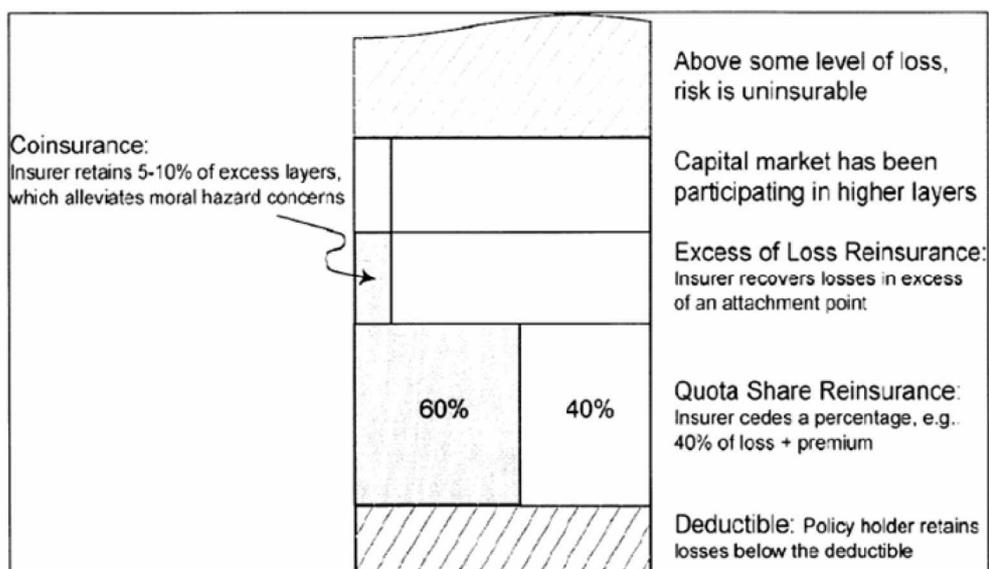
Figure A4.5.1 : Exemple de courbe de risque

(Disponible à http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/Report_on_Phase_I.pdf)

L'évaluation du sinistre maximum possible serait précisément l'étude de l'accident majorant effectuée ci-dessus. Elle permet de caler la queue de distribution du graphique ci-dessus.

À partir de ces données, l'assureur, ou plutôt le secteur de l'assurance et de la réassurance, proposerait une série de tranches d'assurance qui permettrait de distribuer le risque entre divers acteurs. En général, l'assuré porte lui-même une partie du risque par le biais d'une franchise, souvent élevée dans les risques industriels. L'assureur porte une partie du risque et transfère les tranches supérieures vers un réassureur qui peut lui-même se tourner vers le secteur financier mondial²¹. Cette répartition peut être schématisée comme présenté dans la Figure A4.5.2 :

²¹ Cette opération porte le nom de titrisation. Elle consiste à proposer à des investisseurs des titres portant intérêt, mais dont le remboursement est soumis à la non-réalisation de l'événement couvert (d'autres formules sont possibles). Ces titres peuvent intéresser des capitaux à la recherche de diversification, car l'événement couvert est, en principe, non relié aux risques financiers habituels.



Source: Lalonde, David, "Risk Financing" in P. Grossi and H. Kunreuther (editors) (2005), *Catastrophe Modeling: A New Approach to Managing Risk*, New York: Springer.

Figure A4.5.2 : Schéma de la distribution d'un risque entre divers acteurs

Ce schéma (Figure A4.5.2) indique qu'au-dessus d'une certaine limite, le risque est inassurable. C'est précisément le cas du nucléaire pour lequel les assurances proposées sont très faibles au regard des estimations ci-dessus (70 G€ pour S3, 760 G€ pour S1). Le rôle de la prévention apparaît, à nouveau, comme primordial.

Établissons maintenant une courbe du risque d'accident de fusion du cœur avec rejets.

V.3.2. UNE COURBE DE RISQUE POUR LES ACCIDENTS GRAVES

Pour établir la courbe de risque, représentons les courbes de répartition du risque pour l'accident de référence S3 et pour l'accident majorant S1 d'abord séparément, pour les regrouper ensuite sur un même graphique. Notons qu'il s'agit de représentations que l'on peut qualifier de plausibles, permettant de fixer les idées et de poser les problèmes.

Le scénario moyen de l'accident de référence S3 correspond à une perte sociale de 70 G€. Un scénario favorable, que nous assimilons au centile 5%, vaut 40 G€. Un scénario défavorable, assimilé au centile 95% vaut 200 G€. Le graphique suivant (Figure A4.5.3) présente une répartition plausible de ce risque dans le cas où l'accident de référence (S3) se produit, c'est-à-dire une courbe de risque conditionnelle :

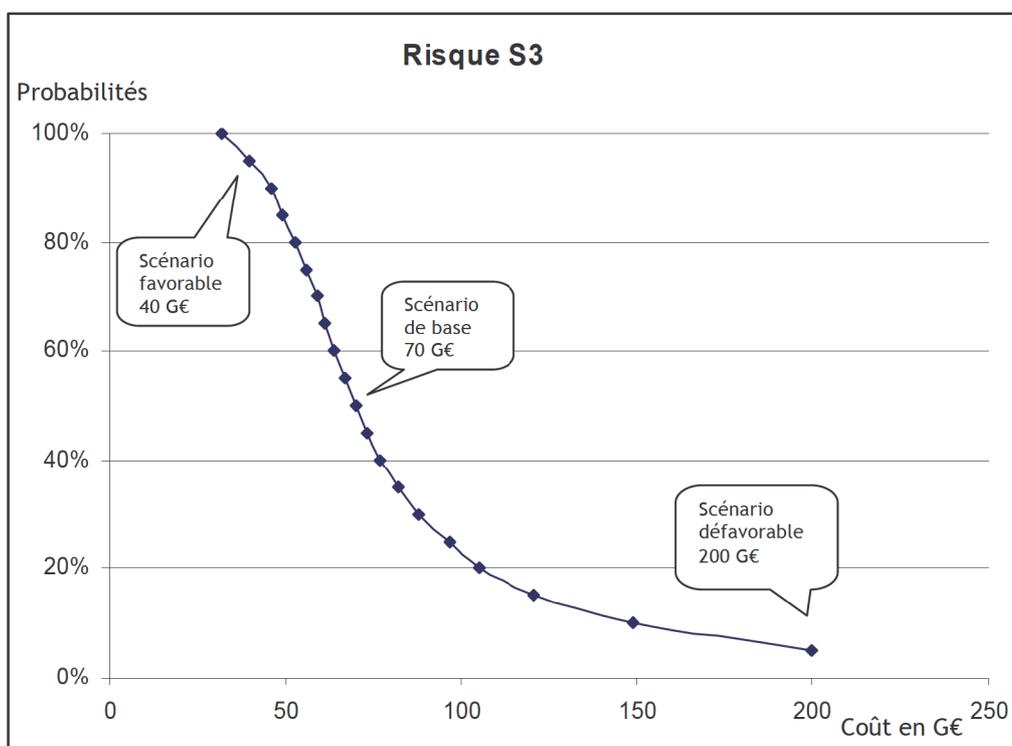


Figure A4.5.3 : Répartition plausible des coûts engendrés par un accident de type S3 (courbe de risque conditionnelle)

Pour l'accident majorant S1, la répartition pourrait être celle indiquée par la Figure A4.5.4 :

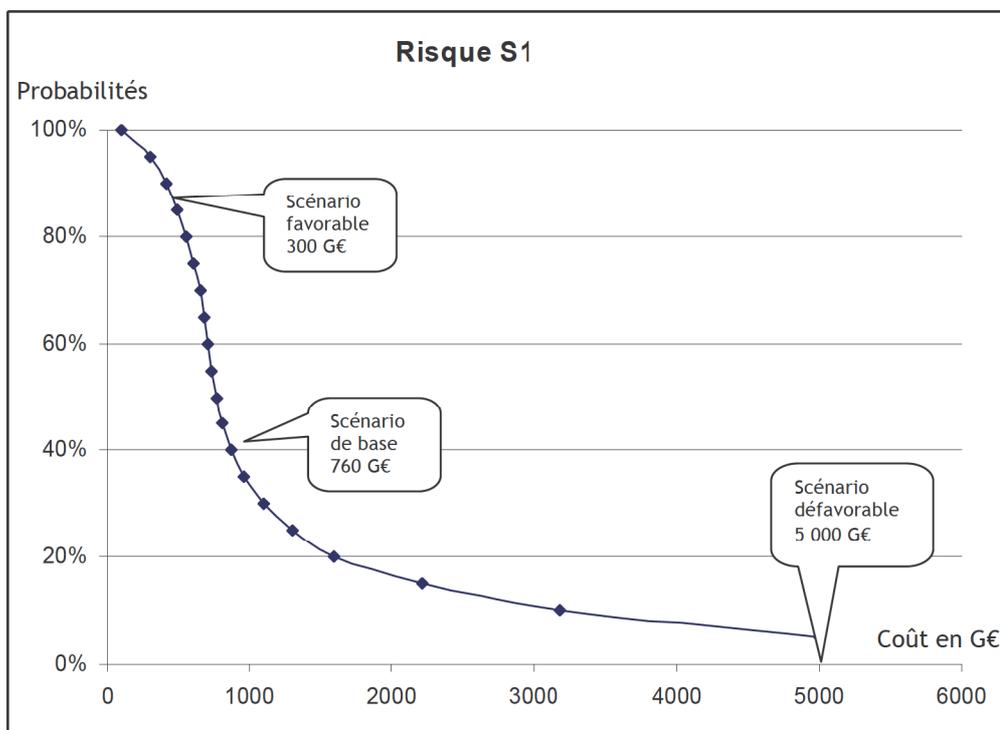


Figure A4.5.4 : Répartition plausible des coûts engendrés par un accident de type S1 (courbe de risque conditionnelle)

Calons maintenant ces deux courbes conditionnelles sur des probabilités plausibles pour les deux accidents, à savoir 10^{-5} pour l'accident de référence (S3) et 5.10^{-7} pour l'accident majorant (S1) soit 20 fois moins que l'accident de référence (Figure A4.5.5) :

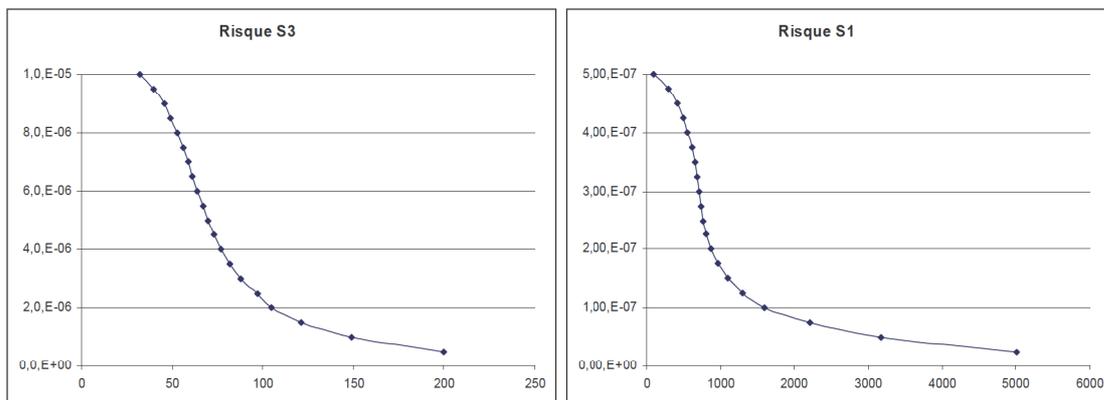


Figure A4.5.5 : Courbes des risques S1 et S3 (non conditionnelles)

Pour positionner ces deux courbes sur un même graphique, le plus commode est d'utiliser un graphique log-log (Figure A4.5.6) :

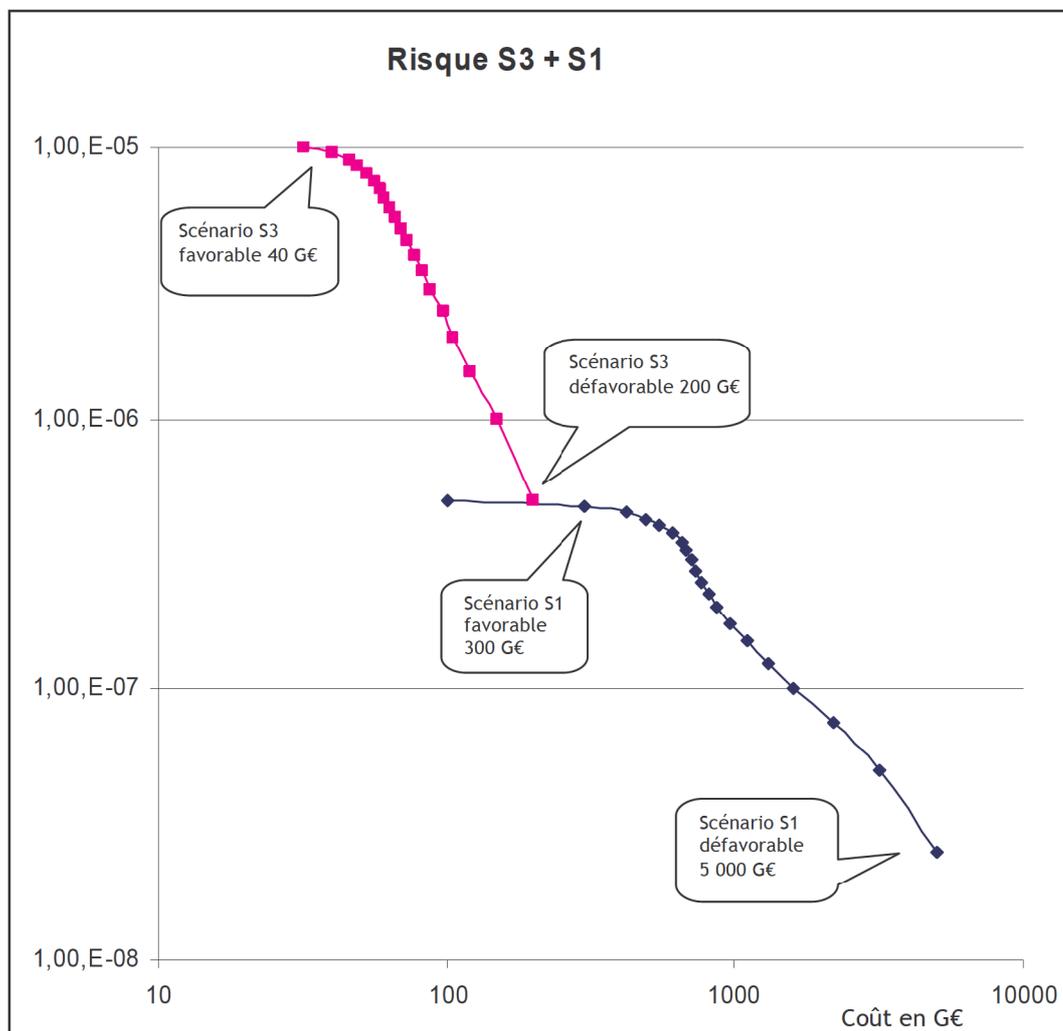


Figure A4.5.6 : Courbe du risque S3 + S1

Sur ce graphique, les deux accidents ressortent clairement séparés. Il est légitime de supposer qu'il existe des accidents intermédiaires. Compte tenu de la configuration des courbes, le plus simple est de supposer que la courbe complète du risque enveloppe ces deux courbes dans une droite comme indiqué sur la Figure A4.5.7 ci-après :

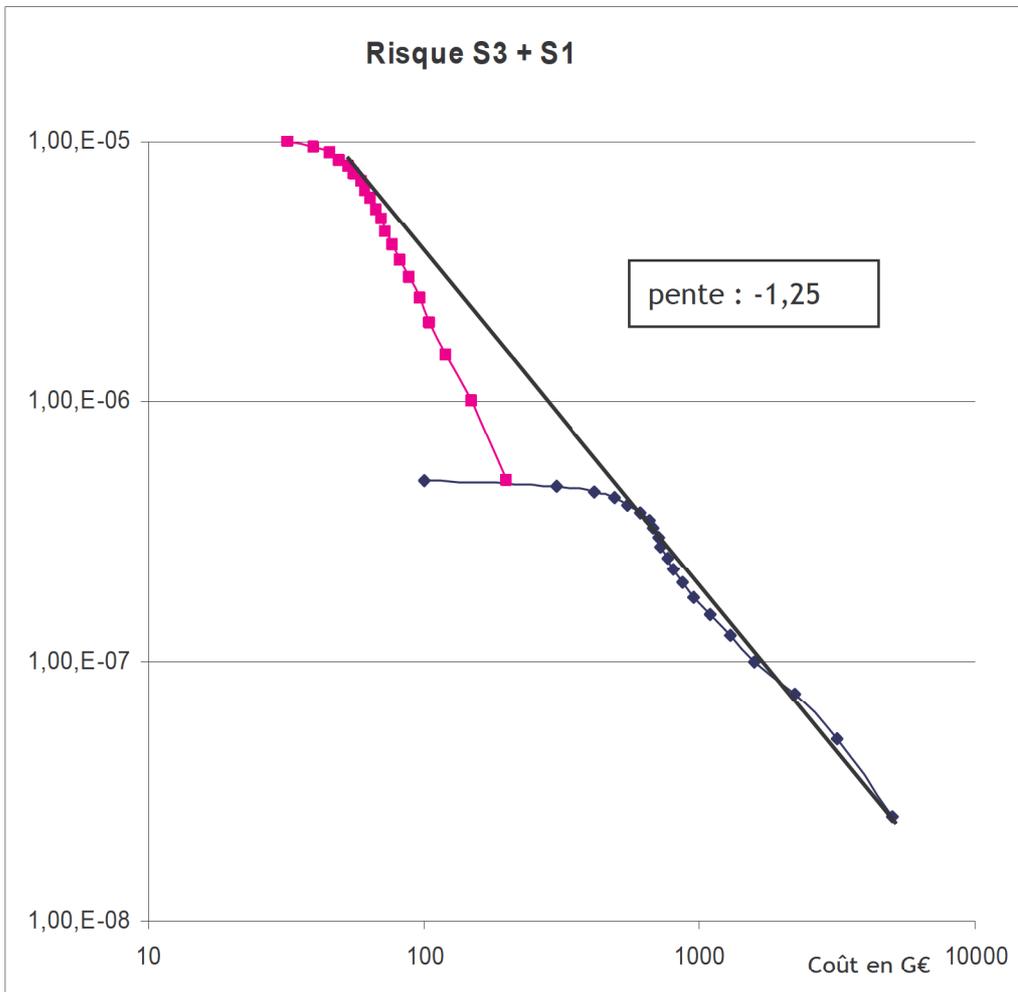


Figure A4.5.7 : Courbe simplifiée du risque total

Ce graphique simplifié a le mérite de représenter simplement les risques à traiter. Il pourrait être précisé et affiné par des études plus poussées. Envisageons maintenant les choix possibles dans ce graphique.

V.3.3. LES MÉTRIQUES D'ACCEPTABILITÉ DU RISQUE

Le diagramme ci-dessous (Figure A4.5.8) présente un exemple de l'approche classique de l'acceptabilité des risques²² :

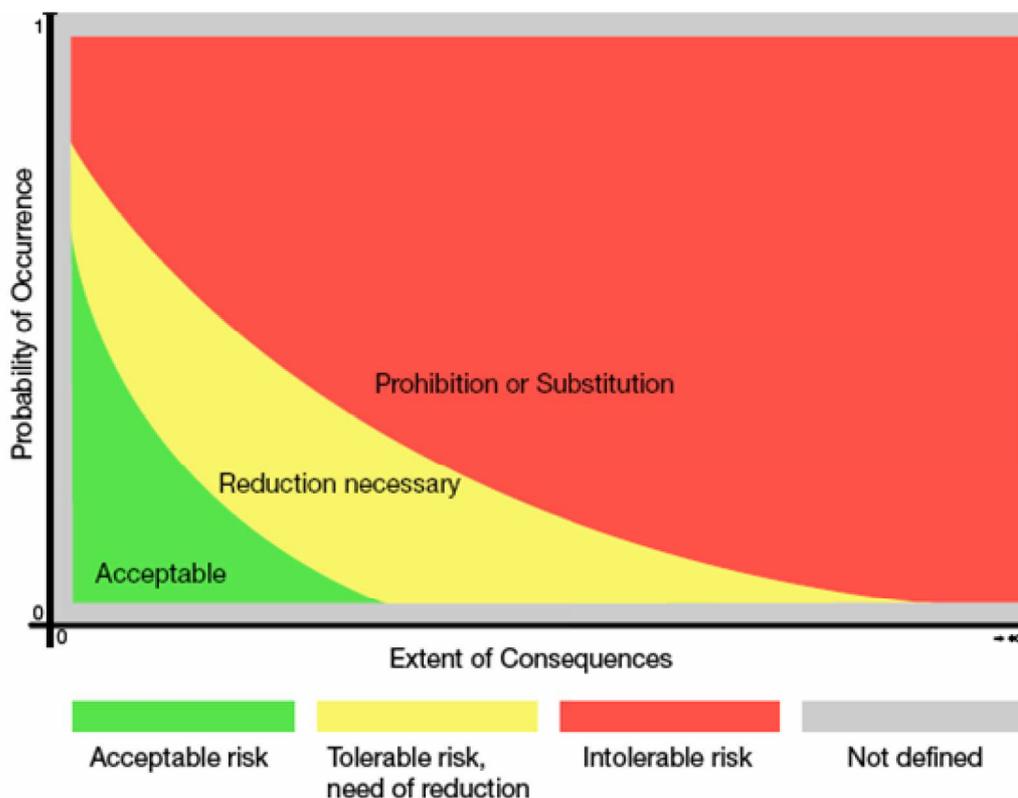


Figure A4.5.8 : Exemple de traitement de l'acceptabilité des risques

Dans ce graphique, la zone inacceptable est en rouge et implique que, si l'on ne peut pas garantir une sûreté meilleure, il faut substituer une autre technologie moins risquée (*"Prohibition or Substitution"*).

Il est possible de représenter des courbes de choix semblables à celle de ce graphique (Figure A4.5.8) sans pour autant fixer de limite absolue – toujours discutable et pas nécessairement souhaitable. La première métrique à considérer est l'espérance mathématique de perte. Cet indicateur range les risques en fonction de la grandeur $p.C$ où p est la probabilité et C le coût moyen. C'est implicitement la grandeur à la base de l'indicateur efficacité-sûreté envisagé par Électricité de France. Les courbes de choix sont des courbes $p.C = Cte$, courbes qui déterminent l'ensemble des points équivalents du point de vue de cet indicateur de choix. Dans un diagramme log-log, ces courbes sont des droites de pente -1. Dans le graphique ci-dessous (Figure A4.5.9), le sens de la flèche est le sens croissant de l'indicateur, c'est-à-dire le sens croissant de l'inacceptabilité du risque.

²² International Risk Governance Council 2005, White paper, [Risk Governance, Towards an Integrative Approach](#), pp. 36-37

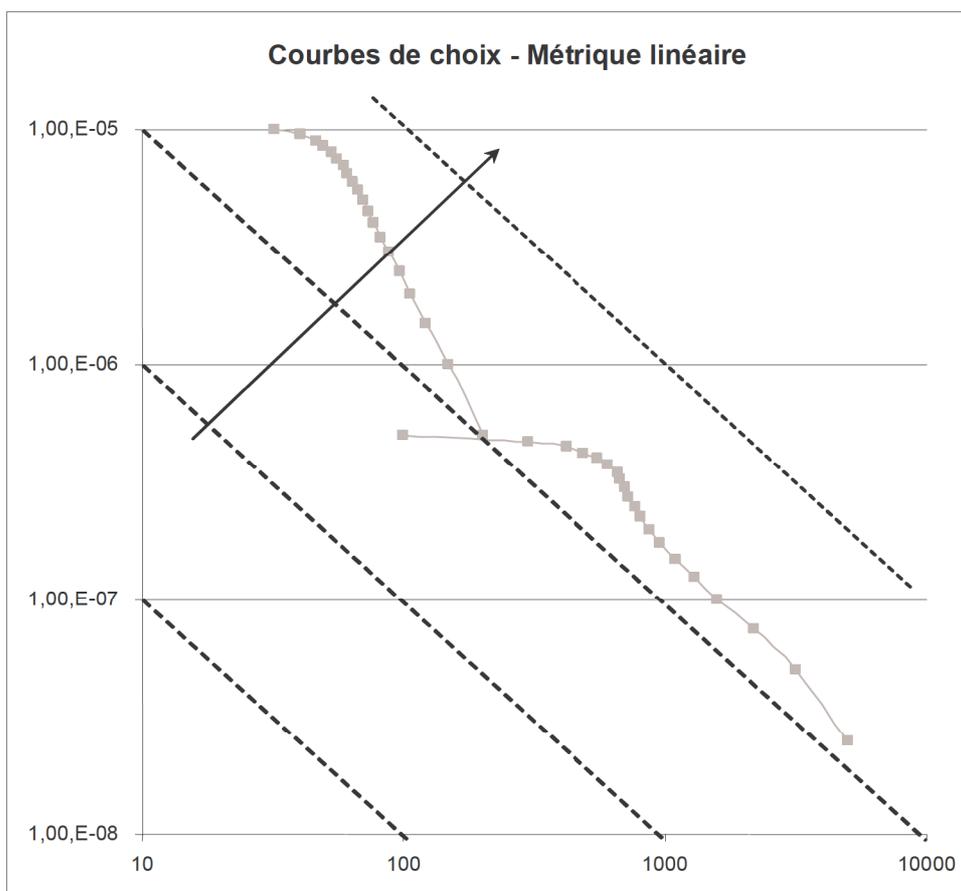


Figure A4.5.9 : Courbes de choix, métrique linéaire

Il existe d'autres métriques. Les Hollandais souhaitent comparer l'ensemble de leurs installations à risques, y compris les installations de protection contre l'inondation (digues et écluses), les usines chimiques, l'aéroport d'Amsterdam, etc. Ils ont mis en place un indicateur simple qui repère la gravité du risque par le nombre de morts et non par le coût (parce que celui-ci est difficile à estimer et n'est pas toujours disponible). Cet indicateur a pour but de prendre en compte à la fois :

- le risque individuel représenté par la probabilité de chaque citoyen de mourir en raison d'un accident (inondation, avec le traumatisme des milliers de morts des inondations de 1953, accident nucléaire, accident d'avion dans les environs de l'aéroport d'Amsterdam, environs qui sont fortement urbanisés, etc.) ;
- le risque sociétal qui prend en compte l'aversion de la société pour les gros accidents. C'est ainsi que le corps social « accepte » en France de nombreux accidents de la route qui font plusieurs milliers de morts par an, mais ressent une forte aversion pour les accidents d'avions de ligne qui font, « d'un seul coup », plusieurs dizaines de morts voir plusieurs centaines. Et ceci s'observe même si, au total, les accidents d'avions tuent beaucoup moins de Français par an que les accidents de la route.

En Hollande, la règle d'acceptabilité d'un scénario d'accident comporte deux critères qui doivent être satisfaits tous les deux :

- le risque individuel doit rester inférieur à 10^{-6} ;
- le risque sociétal doit rester inférieur à $10^{-3} / N^2$ où N est le nombre de tués.

L'encadré ci-dessous montre que le risque individuel est d'abord dominant, mais qu'à partir de 30 morts environ (32 exactement), c'est le critère sociétal qui devient dominant.

<i>Risque sociétal</i>	
Nombre de morts	Probabilité maximum
10	$1,00 \cdot 10^{-5}$
20	$2,50 \cdot 10^{-6}$
30	$1,11 \cdot 10^{-6}$
40	$0,63 \cdot 10^{-6}$
50	$0,40 \cdot 10^{-6}$

À partir de ce seuil, l'indicateur n'est plus linéaire en fonction de la gravité, mais quadratique. Dans le cas qui nous occupe, une métrique quadratique correspond à des courbes de choix ayant pour équation $p \cdot C^2 = \text{Cte}$. Dans un diagramme log-log, ces courbes sont représentées par des droites de pente -2 comme visualisé dans la Figure A4.5.10.

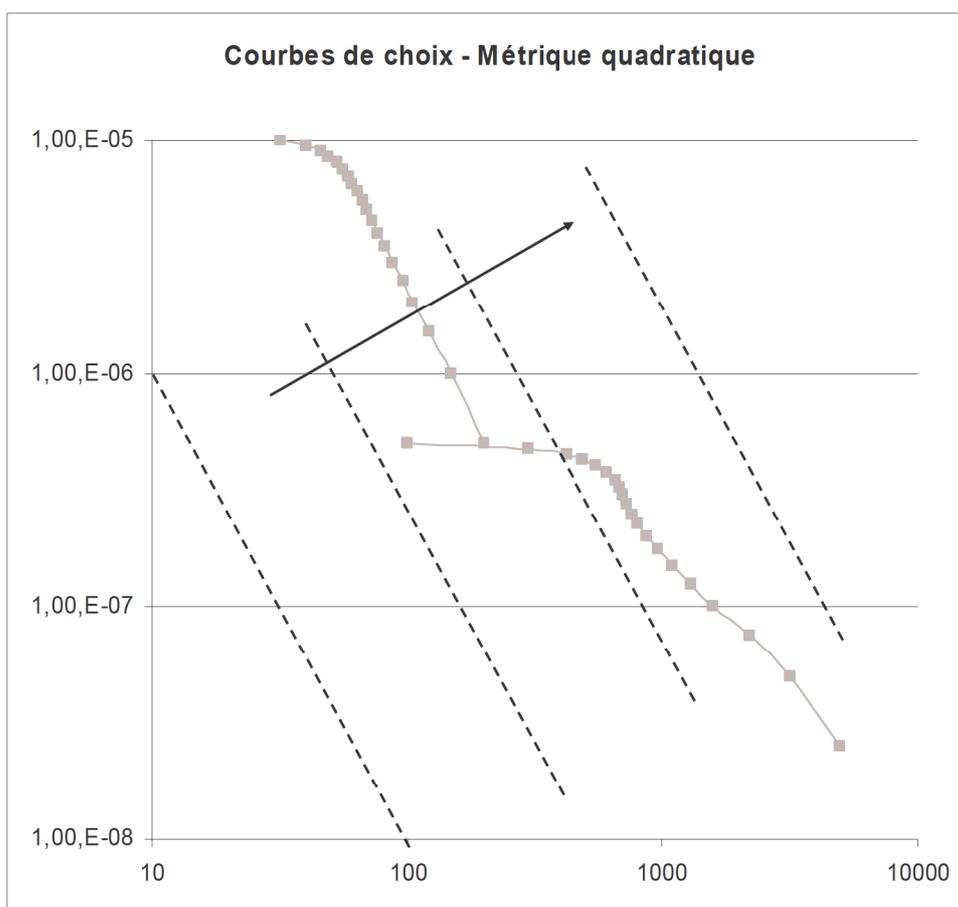


Figure A4.5.10 : Courbes de choix, métrique quadratique

Dans le cas des risques « ordinaires », ni trop rares ni trop onéreux, le critère de choix doit être celui de l'espérance de perte. C'est la pratique des assurances. Elle a prouvé sa valeur pratique. Elle est justifiée par la loi des grands nombres. Pour les risques extrêmes, il n'en est pas ainsi. Les coûts sont immenses et ne peuvent en aucun cas être traités par la loi des grands nombres. Les probabilités n'ont pas le statut de fréquences, mais plutôt celui de probabilités bayésiennes, c'est-à-dire d'informations élaborées a priori, sans expérience statistique de l'événement. Par conséquent, le critère de l'espérance de perte ne s'impose pas sur la base de raisonnements mathématiques et l'on est fondé à examiner d'autres critères, comme par exemple un critère de choix quadratique.

Comme dans le cas hollandais, la métrique retenue doit incorporer ces deux aspects. Les courbes de choix correspondent à $n = 1$ dans la zone des risques ordinaires, non figurée dans le graphique ci-dessus, pour prendre des pentes plus fortes dans la zone des risques extrêmes, seule figurée ci-dessus.

V.3.4. LES CHOIX DE SÛRETÉ SELON DIVERSES MÉTRIQUES

Toutes les métriques de choix en $p.C^n$ sont représentées, dans un graphique log-log, par des droites de pente $-n$, avec $n \geq 1$. Trois cas sont à envisager par rapport à l'exposant n (voir Figure A4.5.11 où l'on se rappelle que la pente de la droite en trait gras est de $-1,25$) :

1. $n < 1,25$: dans ce cas, proche de $n = 1$, la priorité de la sûreté doit être l'accident de référence S3 ;
2. $n > 1,25$: dans ce cas la priorité de la sûreté doit être l'accident majorant ;
3. $n = 1,25$: dans ce cas, il n'y a pas de priorité, les fonds alloués à la sûreté doivent être répartis de façon proportionnée entre les deux accidents.

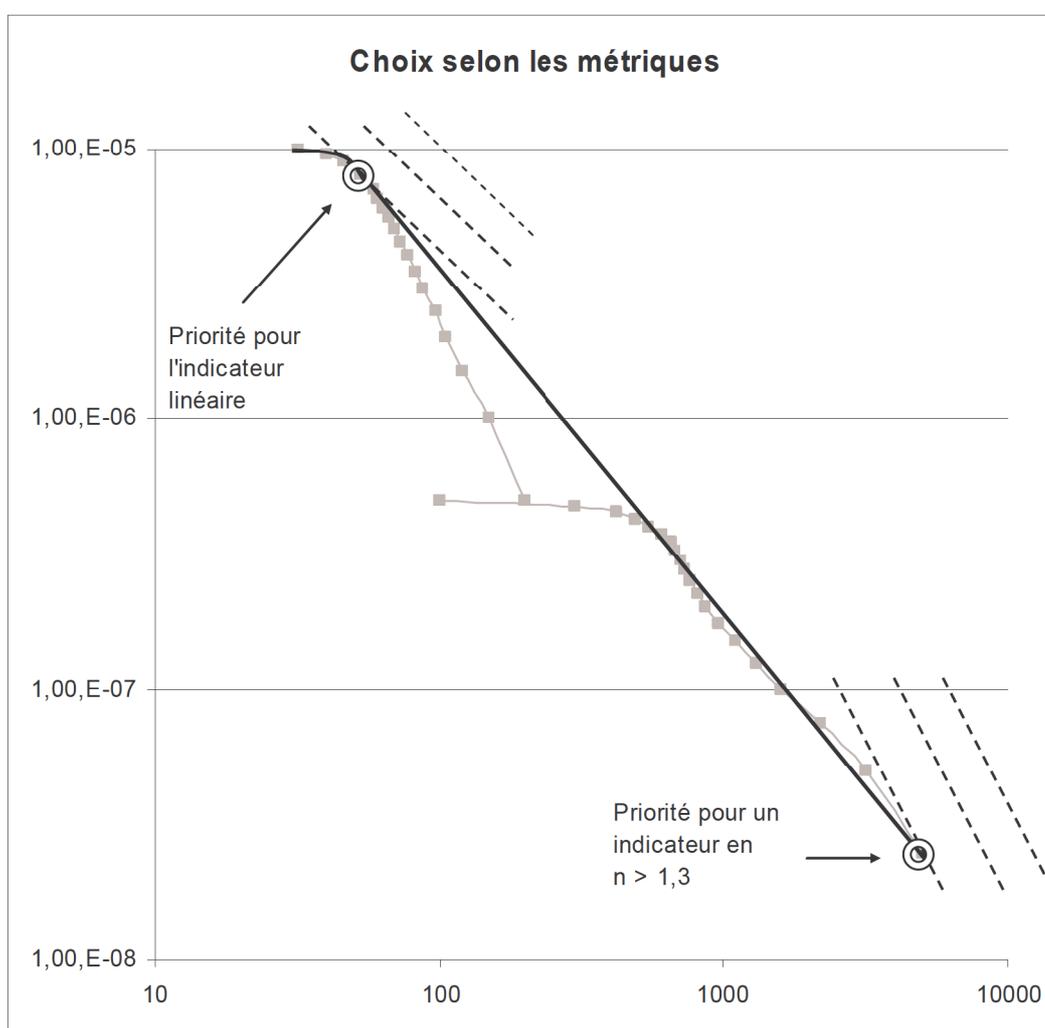


Figure A4.5.11 : Priorité d'allocation des ressources selon les métriques

En termes théoriques, $n = 1$ correspond à une position de neutralité par rapport au risque, alors que $n > 1$ indique une certaine aversion pour le risque. L'ensemble de la communauté de la sûreté nucléaire montre très clairement une forte aversion au risque, aversion parfaitement justifiée comme nous

l'avons vu, mais qui ne serait pas représentée avec une métrique linéaire. Une métrique quadratique, voire une valeur de n plus élevée semble mieux correspondre au consensus existant sur l'aversion relative au risque.

Examinons maintenant la portée pratique des choix possibles.

Dans le cas d'une métrique linéaire, la priorité va à la prévention de l'accident S3 comme le montre la Figure A4.5.11 ci-dessus. Cette disposition pourrait se traduire par le raccourci suivant : « *Priorité à la prévention de S3 au motif que, si S1 est 11 fois plus coûteux que S3, il est toutefois 20 fois moins probable* » (ce sont ici les chiffres de notre exemple plausible ; la courbe de risque réelle devrait être précisée à partir des EPS de niveau 2). Abaisant les probabilités de S3 de diverses valeurs, on trouve ici que, pour ce critère, S3 devient équivalent à S1 dès que sa probabilité est divisée par 2 environ (ramenant le rapport des probabilités au rapport des coûts) et qu'il n'est plus prioritaire ensuite.

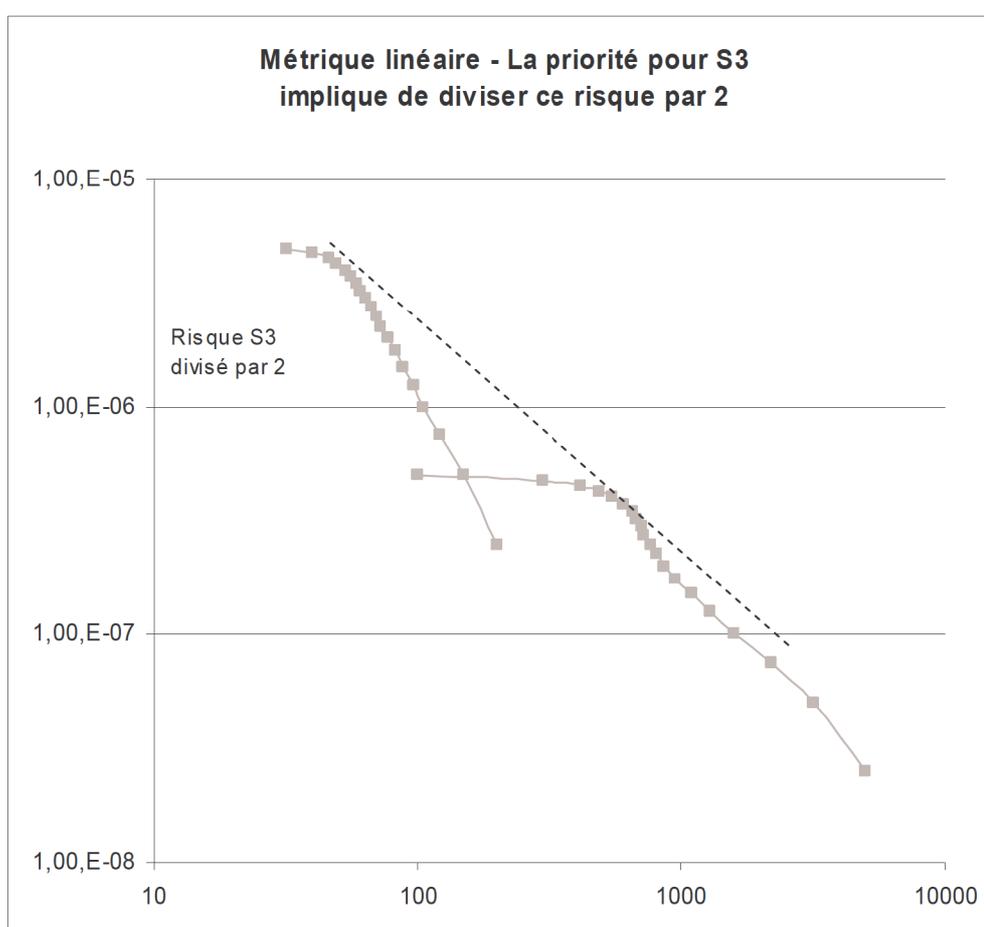


Figure A4.5.12 : Implications de la métrique linéaire

Dans le cas d'une métrique quadratique, la priorité va à la prévention de l'accident S1 (Figure A4.5.11). Le raccourci correspondant serait ici : « *Priorité à la prévention de S1 pour la bonne raison que si l'espérance perte de S1 est, en effet, inférieure à celle de S3, on ne peut se contenter, en présence d'un accident aussi considérable, de raisonnements neutres au risque, et que le risque est très nettement plus inacceptable que S3* ». Divisant alors la probabilité de S1, on constate qu'une division de la probabilité par 6 rend équivalent les deux accidents, à l'exception de la queue de distribution de S1 (voir Figure A4.5.13). Celle-ci ne disparaît totalement des priorités que si le risque est divisé par un facteur de 100 environ.

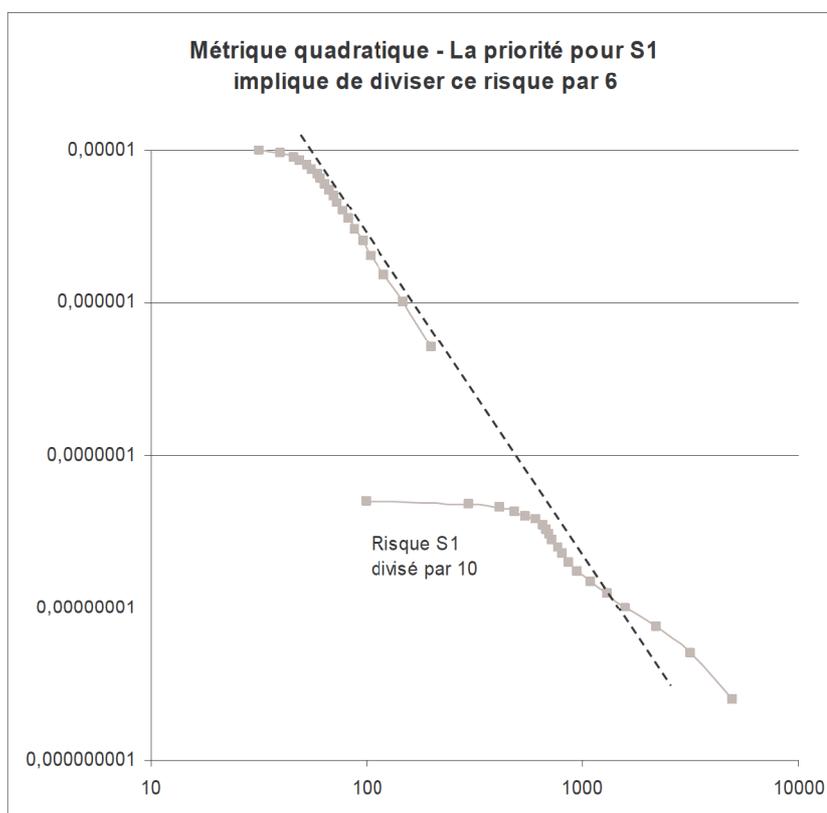


Figure A4.5.13 : Implications de la métrique quadratique

Au-delà de cette réduction de la probabilité d'occurrence de S1, les fonds de sûreté doivent être alloués de façon proportionnée entre les deux accidents de sorte que les deux courbes de risque restent tangentes à une même droite de choix. Cette tangente commune s'abaisse, grâce à l'investissement de sûreté, d'une quantité dy et l'on a :

$$dy = d[\log(p_3)] = d[\log(p_1)]$$

Ce qui donne :

$$dp_3 / dp_1 = p_3 / p_1$$

Les améliorations marginales dp doivent être proportionnelles aux probabilités d'accident et non aux coûts.

Notons ici que cette propriété est générale ; elle ne dépend pas de n . On peut préciser :

$$dp_3 / dp_1 = p_3 / p_1 = C_1^n / C_3^n.$$

Dans le cas de la métrique linéaire, et seulement dans ce cas :

$$dp_3 / dp_1 = p_3 / p_1 = C_1 / C_3,$$

propriété qui n'est valable qu'*après que les accidents S3 et S1 aient été rendus équivalents* au regard de la métrique considérée.

Dans le cas de la métrique quadratique, l'allocation des fonds destinés à améliorer la sûreté suit donc deux phases distinctes :

1. Phase 1 : les fonds sont consacrés à l'amélioration de S1. Le rapport p_3 / p_1 , supposé voisin de 20 aujourd'hui dans l'exemple que nous développons, doit d'abord passer à 120 avec la priorité donnée à la prévention de S1 pour la métrique quadratique. (Cet exercice néglige, à ce stade, la queue de distribution ; il indique que celle-ci devrait être mieux précisée).
2. Phase 2 : les investissements de sûreté visent ensuite à la fois S3 et S1. Les améliorations dp_1 et dp_3 qui en résultent sont telles que dp_3 soit environ 120 fois plus élevé que dp_1 . Ce qui signifie, en pratique, une priorité aux actions d'amélioration de S1, mais pas une priorité absolue. Dans cette phase, un diagramme rangeant les améliorations individuelles de sûreté, leurs coûts figurant en axe des x et leurs gains de probabilité en axe des y (comme proposé par Électricité de France), doit décaler les axes y pour S3 et S1 d'un facteur 120. En gardant toutefois à l'esprit que le jugement ne porte pas fondamentalement sur des améliorations de sûreté individuelles, mais sur le risque résiduel après application de l'ensemble de toutes les actions de sûreté, ce qui inclut un *programme* de modifications, mais aussi la pratique de la sûreté dans tous ses aspects.

Dans le cas de la métrique linéaire, les améliorations de sûreté doivent d'abord faire diminuer p_3 par deux environ ce qui ramène le rapport p_3 / p_1 à 10 environ ; ensuite, les améliorations de sûreté doivent assurer que dp_3 est dix fois plus élevé que dp_1 . Les axes sont décalés d'un facteur 10.

Enfin, dans le cas où n serait précisément égal à 1,25, l'allocation des fonds serait proportionnée entre S1 et S3 dès le premier euro. L'efficacité de l'allocation des ressources de sûreté impliquerait d'assurer que le rapport dp_3 / dp_1 soit égal au rapport des probabilités, soit à 20 dans notre exemple, et non pas au rapport des coûts, voisin de 11 d'après nos estimations. Mais adopter une métrique correspondant à $n = 1,25$ ne correspondrait à aucune rationalité autre que le constat de la position relative des risques des deux accidents aujourd'hui.

S'agissant du choix de la métrique, plusieurs remarques peuvent être proposées :

1. La métrique de choix adoptée devrait, idéalement, être établie en interrogeant les responsables nationaux sur leurs choix (des méthodes permettent de repérer les critères de choix de décideurs, en particulier les niveaux de prudence qu'ils jugent justifiés). À notre sens, les diverses décisions prises sur la scène nationale et internationale depuis 10 ans vont très clairement vers des choix de forte prudence.
2. Comme nous l'avons suggéré, une métrique plus réaliste que les exemples des graphiques ci-dessus comporterait des valeurs de n égales à 1 jusqu'à un certain seuil, celui où l'on entre dans les événements extrêmes, puis seraient des courbes dont les pentes n iraient croissant avec les coûts C . En particulier, si la pente était de 1,25 au voisinage de l'accident S3, elle devrait néanmoins être sensiblement plus élevée au voisinage du scénario de base S1. La priorité à la prévention de S1 serait alors conservée.

On pourrait concocter une métrique de choix avec n croissant et qui serait tangente aux courbes de risques des deux accidents (en négligeant la queue de distribution de S1). Cela rendrait cohérent le choix de répartir les investissements entre S1 et S3 dès le premier euro. Cette approche nécessiterait que n soit voisin de 1 au voisinage de S3 (en tous cas nettement inférieur à 1,25) ce qui paraît très irréaliste.

VI. CONCLUSIONS

Les principales conclusions de cette étude sont synthétisées dans ce chapitre. Les principales limites des estimations proposées et de leurs implications pour la sûreté sont présentées, ainsi que quelques pistes d'approfondissement.

VI.1. PRINCIPAUX RÉSULTATS

L'étude évalue le coût de l'accident de référence S3 à 70 milliards d'euros dans son scénario de base. C'est là une somme considérable pour un accident technologique, une somme qui amène cet accident au niveau des grandes catastrophes récentes telles que le tremblement de terre de Kobé, le cyclone Katrina ou encore les attentats du 11 septembre 2001 à New York.

En termes de coûts, les répercussions sur le parc électronucléaire français arrivent en tête (46%) suivies de la réduction des exportations françaises (39%). S'y ajoutent les coûts sur le site accidenté (10%) et les coûts radiologiques hors site (moins de 5%). Les effets sanitaires sont « faibles ». Aucun territoire n'est fortement contaminé après l'accident.

Ce coût pourrait être réduit, essentiellement si l'accident se produisait vers la fin de vie du parc des 900 MWe. Il pourrait être nettement augmenté si, au contraire, la durée de vie du parc était augmentée. Si l'image exportatrice de la France était mal gérée, des baisses d'exportations plus fortes doivent être redoutées. Au total, dans ces conditions défavorables, les coûts pourraient être multipliés par 3. Le coût de base de 70 milliards d'euros s'inscrit donc dans une plage entre 40 et 200 milliards d'euros.

L'étude évalue le coût de l'accident majorant S1 à 760 milliards d'euros dans son scénario de base soit 11 fois plus que l'accident de référence S3. Cette somme énorme représente environ 45 points de PIB et quelques 19 années de croissance française. La conséquence majeure en termes de coût est la contamination du territoire : 2,5% du territoire sont en zone d'exclusion (un coût estimé à 135 milliards d'euros) et surtout, 9,5% du territoire sont en zones contaminées à plus de 1 Ci/km². Le coût social de cette contamination est évalué à 15 milliards d'euros par an, sur la base du retour d'expérience de la Biélorussie, des coûts qui se cumulent pour un total actualisé de plus de 250 milliards d'euros. L'ampleur de la question des territoires contaminés apparaît en pleine lumière. Cette contamination majeure et durable représente plus de la moitié du coût de l'accident, à près de 400 milliards d'euros. Le second poste de coût de l'accident majorant est le coût d'image qui se monte ici à 130 milliards d'euros soit 17% du coût total de l'accident. Viennent ensuite les coûts radiologiques hors site. Avec une hypothèse de boycott des aliments contaminés, le nombre de cancers mortels radio induits se monte à 25 000 en moyenne.

Une météo favorable au moment de l'accident ferait baisser le coût de l'accident de 40% en réduisant les surfaces contaminées et le coût des relogements. En revanche, avec des conditions météorologiques très défavorables, les zones d'exclusion sont 3,5 fois plus étendues, les autres surfaces contaminées sont multipliées par 17, et le coût total de la contamination approche 5 000 milliards d'euros... Ce coût social astronomique est dû au grand nombre de victimes calculées par le code Cosyma : plus de 5 millions de réfugiés des zones d'exclusion, environ 2,5 millions de personnes en zones fortement

contaminées et 90 millions en zones moins fortement contaminées. Ces chiffres indicatifs du scénario le plus pénalisant montrent qu'une part sans doute significative des victimes serait située hors de France. Ainsi, dans le cas de l'accident majorant S1, les conditions météorologiques décident en grande partie du sort de millions de personnes et de l'avenir du pays. Prenant en compte les autres facteurs de variabilité, le coût de l'accident majorant peut descendre à 300 milliards d'euros mais peut aussi atteindre 5 800 milliards d'euros.

En résumé, si l'accident de référence S3 est d'un coût très élevé, il reste gérable, alors que l'accident majorant S1 est ingérable et engage probablement le pays dans un déclin économique prolongé. Dans tous les cas, l'évaluation économique conforte largement la priorité accordée à la sûreté et à la sécurité.

Ces estimations permettent d'établir la courbe de risque d'un accident grave avec rejets, c'est-à-dire la distribution de probabilité des coûts dus à un accident. Cet exercice est réalisé avec des valeurs plausibles pour les probabilités d'accident dus à des initiateurs internes. Cette courbe permet d'éclairer la question de l'allocation des ressources de sûreté c'est-à-dire la façon d'obtenir la meilleure sûreté possible à partir de ressources limitées.

La « meilleure » allocation des ressources n'est pas une notion absolue ; elle dépend évidemment des options adoptées par les décideurs, notamment de leur degré d'aversion au risque. Ces préférences se traduisent par des métriques de choix applicables à la courbe de risque. Une approche totalement neutre au risque se traduirait par une métrique « linéaire » qui prendrait pour critère l'espérance mathématique de perte de l'accident. Les estimations qui précèdent montrent que les événements considérés sont des événements extrêmes, auxquels la loi des grands nombres ne saurait s'appliquer, et pour lesquels une telle approche est infondée. Une approche raisonnablement prudente considérerait des métriques de choix plus exigeantes, par exemple une métrique « quadratique ». La rationalité conduirait probablement alors à donner la priorité à la réduction de probabilité de l'accident majorant, puis, une fois cette probabilité abaissée à un certain seuil, à allouer les ressources entre les deux accidents de façon que les baisses de probabilité réalisées soient proportionnelles aux probabilités d'occurrence. Allouer les ressources en fonction du rapport des coûts des deux accidents n'est, en général, pas correct.

VI.2. LIMITES DE L'ÉTUDE, APPROFONDISSEMENTS SOUHAITABLES

Pour l'estimation du coût de l'accident de référence S3, il conviendrait en particulier d'approfondir les hypothèses à retenir concernant les effets sur le parc.

Pour l'accident majorant, la principale limite est l'estimation sans doute trop simple du coût de la contamination des territoires. Il conviendrait de confirmer la distribution de la contamination avec des modèles de diffusion intégrant les avancées de ces 20 dernières années et de préciser les conditions atmosphériques particulièrement défavorables puisque l'étude identifie qu'il existe là une grande variabilité des coûts. Par ailleurs, la situation qui résulterait d'un accident majorant serait d'une extrême complexité et il est difficile, aujourd'hui, de définir précisément la meilleure façon de gérer ces territoires contaminés et de minimiser le coût social de la contamination. Le retour d'expérience de

l'expérience biélorusse est la meilleure source actuelle sur cette problématique, mais il reste insuffisant. Il met en lumière l'ampleur du problème et souligne la nécessité de l'étudier plus avant.

S'agissant des implications pour la sûreté, la principale limite réside dans les connaissances encore imparfaites dont on dispose sur la courbe de risque. Le cadre d'analyse dégagé dans cette étude paraît solide, mais les enseignements qu'on en tire dépendent évidemment des données spécifiques sur le risque. Une importante limite est de ne considérer que deux termes source. Une autre est de ne pas prendre en compte les initiateurs externes. Une troisième est de ne pas considérer les malveillances et de possibles attaques. Du point de vue économique, l'efficacité de l'allocation des ressources peut évidemment en être considérablement réduite.

La pauvreté des données sur les actions de décontamination conduit à une sous-estimation des coûts. Cette lacune concerne particulièrement le scénario majorant dans le cas où la contamination du territoire affecterait une zone urbaine. Au-delà de cette composante urbaine potentiellement très coûteuse, les estimations présentées négligent de nombreux autres types de décontamination (qui ne sont pas traités dans Cosyma) : décontamination des routes, des voies ferrées, des voies navigables, des adductions d'eau, des nappes phréatiques, de certaines zones boisées, etc.

Des études complémentaires permettraient également d'approfondir, dans un deuxième temps, la variabilité des conséquences en fonction du lieu de l'accident. Le cas de Gravelines, par exemple, devrait être assez différent de celui de Dampierre. Non seulement le site possède six réacteurs au lieu de quatre, mais les zones proches sont urbaines et très peuplées. En outre, des équipements industriels importants (usines, hauts fourneaux, port de Dunkerque) seraient affectés par la contamination ainsi que des voies de passage importantes (Paris-Bruxelles, Paris-Londres, etc.).

Cette étude donne une image des conséquences économiques de l'accident nucléaire de référence S3 et de l'accident majorant S1 et en propose des quantifications. Il convient, en conclusion, de mettre en garde contre des utilisations trop rapides du coût total, ce chiffre unique qui condense en une seule valeur monétaire toute une série de considérations de natures différentes. Cette mise en garde sur l'utilisation isolée du seul coût du scénario de base s'applique, et de façon bien plus forte, à l'utilisation des baisses de probabilité (dp) apportées par un investissement de sûreté. Représenter les bénéfices de sûreté par ce dp risque de dissimuler la nature de ces bénéfices tout autant qu'éclairer les choix. Dans cet esprit, l'utilisation de courbes de risque telles que celles présentées dans cette étude pourrait être plus pédagogique que celle de diagrammes « coût des modifications versus gains de probabilité » de ces modifications. Elle gagnerait, néanmoins, à être complétée par la description des composantes du coût total, par exemple une description en unités physiques qui facilite la visualisation concrète des conséquences. À traiter les vulnérabilités de façon trop abstraite, il existe, en effet, un risque de banalisation qui ne va pas dans le sens d'une bonne culture de sûreté.

Par ailleurs, dans l'optique d'une utilisation de méthodes coût-bénéfice pour les troisièmes visites décennales des réacteurs de 1300 MWe, il serait intéressant d'évaluer les conséquences économiques d'un accident grave survenant sur un site de 1300 MWe. En attendant la réalisation d'EPS de niveau 2 par Électricité de France ou par l'IRSN pour les réacteurs de ce palier, une évaluation des conséquences économiques des accidents (notamment les scénarios intermédiaires entre S1 et S3), tels qu'ils ressortent des EPS de niveau 2 pour les réacteurs du palier 900 MWe, permettrait de faire progresser ces évaluations.

ANNEXE : LE CODE COSYMA ET SON UTILISATION DANS L'ÉTUDE

Un code de conséquences radiologiques

Cosyma a été développé dans le cadre de projets européens. Lancé en 1983, le projet MARIA (Methods for Assessing Radiological Impact of Accidents) œuvre à développer un programme de calcul informatisé qui reprenne les méthodes d'évaluation de conséquences utilisées en Europe. Le résultat, essentiellement obtenu par FZK et le NRPB, est nommé *COde SYstem from MAria* ou Cosyma. C'est un vaste code, difficile à utiliser par les non spécialistes et requérant une grosse machine informatique (*mainframe computer*). Il est donc décidé d'en réaliser une version pour PC. La seconde version est diffusée en 1995. C'est celle qui est utilisée dans la présente étude.

Cette version comporte un module économique, mais le modèle calcule essentiellement des conséquences radiologiques. Celles-ci se manifestent sous forme de conséquences directes du panache et sous forme de conséquences collectives de l'ingestion d'aliments contaminés. Les modèles de diffusion sont plus développés et plus précis pour les faibles distances. Les doses sont calculées par organe, en utilisant les coefficients de la CIPR. Les listings de sortie de la version PC ne fournissent pas de dose équivalente corps entier. Les calculs de dose collective reprennent des bibliothèques de résultats précalculés.

Le coût de ces conséquences est calculé dans le module économique en prenant en compte les contre-mesures destinées à les réduire.

Les contre-mesures considérées sont des mesures d'urgence (évacuation, confinement et ingestion d'iode stable) et des interdictions alimentaires. Ces dernières se traduisent par des coûts pour l'agriculture. C'est la composante économique traitée dans Cosyma. Toutefois, les conséquences globales pour le secteur agricole ne sont pas considérées, en particulier les possibles réductions d'exportations. De plus, les effets sur l'industrie et les communications ne sont aucunement envisagés. L'étude montre à quel point les conséquences radiologiques, telles que calculées par Cosyma, ne constituent qu'un aspect des conséquences d'accident et que cet aspect ne pourrait être dominant qu'avec des hypothèses très fortes.

Les limites de Cosyma

En tant que code de conséquences radiologiques, Cosyma a de nombreuses limites : des simplifications telles que considérer les régions affectées comme planes, sans forêts ni cours d'eau ; l'absence de coûts de gestion ; la faiblesse de l'aspect décontamination – autant d'aspects qui tendent à sous-estimer les coûts d'accident.

En revanche, le modèle n'inclut aucune contremesure agricole. Sur la base de l'expérience post-Tchernobyl, notamment en Norvège, cela surestime les coûts.

L'étude traite une partie de ces biais en corrigeant les quantités d'interdictions alimentaires (pour tenir compte de contre-mesures agricoles) et en valorisant directement les cancers radio-induits en dehors

du code. Une fois ces corrections apportées, les études de sensibilité montrent que l'image globale de l'accident n'est pas fondamentalement remise en cause par des choix différents des paramètres.

Les incertitudes

Le code Cosyma a été évalué par des spécialistes européens et américains au cours d'un programme appelé « *Probabilistic Accident Consequences Uncertainty Analysis* ». Quinze rapports ont été produits par ce projet entre 1995 et 2001²³. Ces rapports restent à exploiter, mais sur la base d'entretiens directs avec des spécialistes (L. Goossens, un des directeurs du projet, E. Gallego excellent connaisseur de tels modèles), il semblerait que Cosyma ne souffre pas de grande sous-estimation de l'étendue des conséquences et que les résultats sont meilleurs à des distances proches de la source.

Les résultats de l'étude suggèrent qu'il conviendrait de préciser les surfaces contaminées, par exemple en utilisant des modèles de diffusion plus modernes et plus puissants. Cosyma pourrait, en effet, surestimer les surfaces, par exemple en exagérant les distances de transport des particules lourdes et en ne considérant aucun effet de masque par les reliefs.

Quelles que soient ses limites, Cosyma reste probablement un outil acceptable pour estimer des différences entre scénarios. Il est assez facile d'utilisation même s'il n'est pas convivial au sens où nous l'entendons aujourd'hui (il fonctionne sous Windows 95...). Il aide à comprendre le poids des diverses composantes des coûts radiologiques d'un accident nucléaire.

²³ Voir le rapport final « *Overall Uncertainty Analysis* » CE, Euratom, EUR 18826. Voir également Radiation Protection Dosimetry, Vol. 90, No. 3 (2000)