

Université de Montréal

Doit-on procéder à la réfection de l'unité 2 de la centrale
thermonucléaire de Pickering A?

Une application du principe de précaution



Minimisation de coûts économiques

Par
Jean-Benoit Lord

Département de sciences économiques
Faculté des arts et des sciences

Juillet 2005

© Jean-Benoit Lord 2005

Résumé :

L'objectif de ce rapport est d'évaluer, à l'aide d'une analyse coûts/efficacité, l'alternative la plus efficace économiquement pour pallier au manque énergétique ontarien. Deux projets sont présentement à l'étude : la réfection d'une centrale thermonucléaire et la construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel. Pour en arriver à déterminer lequel des deux projets est le plus rentable économiquement, nous procéderons par la méthode de minimisation des coûts économiques. L'une des particularités de notre analyse est que nous considérerons deux objectifs sociaux distincts poursuivis par la société ontarienne. Premièrement, un désir d'efficacité stricte, soit le projet ayant le meilleur rendement économique. Deuxièmement, le désir d'équité intrinsèque à la population. Par équité, nous ferons référence à l'efficacité économique du projet, mais aussi nous considérerons tous les impacts indirects de nos projets sur les gens formant la collectivité. Pour se faire, une attention particulière sera portée sur les externalités et les risques d'incidents nucléaires par l'application du principe de précaution. En plus de le définir et de justifier son utilisation, nous exposerons une méthode qui permet une approche quantitative du principe de précaution. Nous serons par conséquent en mesure d'ajouter à notre analyse coûts/efficacité le désir de précaution de la société ontarienne face aux risques nucléaires. À ce chapitre, les principales conclusions de l'analyse vont démontrer que la centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel est le projet optimal si l'on se base du point de vue équité et la réfection de la centrale nucléaire, lorsque l'on se place du côté de l'efficacité stricte.

Mots clés : Accident nucléaire, externalité, principe de précaution, approche de précaution, risque nucléaire, danger nucléaire, précaution.

Table des matières

| | |
|---|----|
| 1. SOMMAIRE EXÉCUTIF | 4 |
| 2. MISE EN CONTEXTE | 5 |
| 3. SOLUTIONS PROPOSÉES | 6 |
| 4. DONNÉES DE BASE | 7 |
| 5. MODÈLE | 7 |
| 6. PRÉSENTATION DES COÛTS ET EXTERNALITÉS | 9 |
| 7. DÉTERMINATION DU TAUX SOCIAL D'ACTUALISATION | 11 |
| 8. ÉVALUATION, MONÉTISATION ET ACTUALISATION DES PROJETS. | 12 |
| Construction de la centrale à cycle combiné (gaz naturel) | |
| • Coûts de construction | 12 |
| • Coûts annuels d'opération | 13 |
| • Coût du carburant | 13 |
| • Externalité: émission de gaz à effet de serre | 14 |
| Réfection de l'unité 2 de la centrale nucléaire de Pickering A | |
| • Coûts de construction | 16 |
| • Coût annuel d'opération | 16 |
| • Gestion des déchets et fond de décontamination | 17 |
| • Coût du combustible | 17 |
| 9. EXTERNALITÉ ET RISQUE NUCLÉAIRE : MISE EN PLACE DU PRINCIPE DE PRÉCAUTION | |
| • Définition | 18 |
| • Justification | 21 |
| • Présentation de la méthode | 23 |
| ○ Détermination de la proportion de richesse que les individus sont prêt à payer. | 24 |
| ○ Détermination des scénarios et des paramètres | 29 |
| ○ Présentation des résultats de la loterie | 34 |
| ○ Évaluation de la perte de richesse statistique | 35 |
| ○ Monétisation du principe de précaution | 39 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 10. ANALYSE COÛT-EFFICACITÉ | 41 |
| 11. ANALYSE DES RÉSULTATS | 43 |
| 12 .CONCLUSION | 46 |
| 13. BIBLIOGRAPHIE | 48 |

Liste des tableaux

| | | |
|--------------------|---|----|
| Tableau 1 : | Estimation des probabilités individuelles de décès et de maladie suite à un incident nucléaire. | 32 |
| Tableau 2 : | Proportion de richesse perdue pour chaque état du monde. | 33 |
| Tableau 3 : | Probabilités relatives à chaque état du monde. | 34 |
| Tableau 4 : | Proportion de richesse que les gens sont prêts à payer. | 35 |
| Tableau 5 : | Nombre de personnes touchées pour chaque état du monde. | 36 |
| Tableau 6 : | Valeurs de la vie et de la santé perdues pour chaque état du monde. | 37 |
| Tableau 7 : | Richesse personnelle moyenne perdue suite à un incident nucléaire. | 38 |
| Tableau 8 : | Montant moyen que les gens sont prêts à payer par le principe de précaution. | 39 |

1. Sommaire exécutif

La présente étude économique a pour but d'évaluer économiquement, selon deux approches, si la réfection de l'unité 2 de la centrale thermonucléaire de Pickering A représente une alternative supérieure à la construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel. Les deux approches que nous aborderons dans cette analyse sont issues de deux objectifs distincts poursuivis par la société. Premièrement, selon un désir d'efficacité stricte, soit le projet ayant le meilleur rendement économique. Deuxièmement, selon le désir d'équité intrinsèque à la population. Lorsque nous ferons référence au désir d'équité, nous prendrons en compte l'efficacité économique du projet, mais aussi ses impacts indirects sur les membres qui forment la collectivité et leurs perceptions. Pour se faire, l'aspect équité sera abordé de façon exhaustive par le principe de précaution. Nous aurions pu intégrer le principe de précaution aux autres coûts et avantages d'une analyse strictement basée sur l'efficacité. Toutefois, il nous paraissait important de démontrer qu'il existe une distinction entre l'efficacité stricte et l'équité, distinction motivée par des ambitions différentes à l'intérieur même de la société.

Pour déterminer lequel des deux projets est le plus rentable économiquement, nous utiliserons la technique dites de minimisation des coûts économiques, soit la méthode analyse coûts/efficacité (« cost-effectiveness »). Cet outil nous permettra de quantifier et de monétiser tous les coûts et externalités inhérents aux deux projets. Une fois déterminées, les valeurs obtenues seront agrégées pour permettre la comparaison des deux alternatives. Les deux projets étant mutuellement exclusifs, la comparaison se fera pour un horizon et un niveau de production communs, conférant ici des avantages constants. Il est à noter que nous traiterons des résultats de notre analyse selon l'efficacité et l'équité séparément.

Le modèle utilisé consiste donc en la valeur actualisée (VA) incrémentale, soit la différence entre tous les flux économiques générés par les deux alternatives. La valeur finale de la VA déterminera quel projet est le plus rentable économiquement. Toutes les

valeurs obtenues durant notre étude seront monétisés en dollar présent, soit l'année de référence 2005, au taux d'actualisation social pertinent. Hormis les coûts explicites des deux centrales, nous porterons une attention particulière aux externalités produites par les deux projets ainsi qu'à l'application du principe de précaution à l'énergie nucléaire. Les fonds investis étant publics, l'analyse est faite pour l'ensemble de la société ontarienne et nous ferons ainsi référence à la fonction d'utilité sociale. Tel que mentionné précédemment, l'analyse se fera en deux temps. Premièrement, nous déterminerons lequel des projets est le plus rentable du point de vue efficacité stricte. En second lieu, nous prendrons en compte le désir d'équité et de protection de la population pour mettre en application le principe de précaution. La justification du recours au principe de précaution sera explicitement traitée plus loin dans le document.

L'analyse subséquente va démontrer que la centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel est le projet optimal si l'on se base du point de vue équité. Par contre, lorsque l'on se place du côté de l'efficacité stricte, la réfection de la centrale nucléaire est la solution optimale. Une analyse et un soin particulier seront portés à l'élaboration et à la justification du principe de précaution, principal axiome de notre hypothèse d'équité.

2. Mise en contexte

Pour des raisons politiques et environnementales, le gouvernement ontarien prévoit retirer la totalité de ses centrales au charbon d'ici 2007. Cette décision implique un manque à gagner de 7 500 MWh. Le gouvernement prévoit fermer la première centrale à la fin 2005, ce qui représente une perte nette de 1 200 MWh. Par conséquent, *l'Ontario Power Generation* (OPG), l'organe publique de production d'énergie en Ontario, a besoin d'une solution rapide pour pallier à ce problème. Le gouvernement a déjà emboîté le pas en donnant l'aval à la réfection de l'unité 4 de la centrale Pickering A. Les travaux seront finis d'ici novembre 2005, mais il reste toujours un manque à gagner de 600 MWh. Deux opportunités techniquement crédibles sont envisagées : la

réfection d'un autre réacteur thermonucléaire (l'unité 2) ou la construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel.

Un rapport récent, chapeauté par le député John Manley, recommande la réfection et le retour massif au nucléaire. Toutefois, cette idée est très mal accueillie par la population ontarienne, qui anticipe là un prochain fiasco et la continuité des dangers reliés à l'énergie atomique. Le gouvernement ontarien fait donc face à une virulente opposition quant au projet de réfection, car l'industrie nucléaire est un problème séculaire en Ontario. La construction originale dans les années 60, la première réfection dans les années 80 et la réfection plus récente de Pickering B ont tous trois dépassé les coûts prévus de façon astronomique (de 50% à 200%). D'autant plus que nombre de scientifiques laissent planer des doutes quant à la sécurité réelle de ces installations et de leurs effets sur les générations futures. D'un côté, l'impopularité de l'énergie atomique dans la population exerce une pression constante sur le gouvernement. De l'autre, les lobby écologiques, propulsés par l'accord de Kyoto, militent contre l'énergie thermique, étant donné ses émissions de gaz à effet de serre. Le gouvernement ontarien fait donc face à un choix déchirant et n'a qu'un très court laps de temps pour prendre une décision. Notre analyse semble donc toute indiquée pour éclairer ces questions délicates.

3. Solutions proposées

Deux projets sont envisagés par le gouvernement. Premièrement, la réfection de la deuxième des quatre unités de la centrale thermonucléaire de Pickering A. Cette centrale sera bientôt inutilisée et prête pour une réfection imminente. Deuxièmement, la construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel d'une puissance équivalente. La particularité ici tient au temps dont dispose le gouvernement pour mener à terme ce projet, soit au plus dix-huit mois. Les deux projets ont un horizon et un temps de construction identiques, soit quinze mois pour la mise en fonction et une espérance de vie de treize ans. Il est à noter également que les deux centrales ont une capacité de production équivalente, soit environ 580 MWh.

4. Les données de base

Les données relatives aux frais de construction et d'opération annuels pour le gaz et le nucléaire nous sont fournies par deux études récentes de l'OPG¹ et du CER². Les données relatives aux externalités des différents projets parviennent de *Ressources Naturelles Canada*, de l'*Agence Nucléaire Canadienne*, de la *Commission Européenne ExternE* ainsi que de l'*AECL*. Toutes les données présentées dans le rapport seront utilisées le plus efficacement possible pour ainsi minimiser la marge d'erreur de nos résultats.

5. Le Modèle

Comme spécifié, le modèle utilisé est un modèle coût-efficacité qui a pour objectif de déterminer quelle alternative est la plus rentable du point de vue de la société. Les fonds impliqués étant publics, le recours à la fonction d'utilité sociale est justifiée. Les deux projets sont mutuellement exclusifs, c'est-à-dire que le gouvernement ne retiendra qu'une seule des alternatives, selon un ordre de préférence. Le tout se traduira par une minimisation des coûts obtenue par l'analyse incrémentale des deux projets. C'est ainsi que nous ferons le différentiel entre tous les flux des deux alternatives, ceci étant possible puisque les avantages conférés par les projets sont constants.

La méthode se nomme valeur actualisée (VA) incrémentale. Nous procéderons de la sorte : déterminer et actualiser, au taux social discuté plus bas, les différents flux pour les deux projets (coûts et externalités) et ensuite utiliser l'approche différentielle pour déterminer l'ordre de préférence des alternatives. Tel que discuté, la décision finale sera prise sur le différentiel des deux projets pour l'approche efficacité mais aussi pour l'approche équité. Il est à noter que l'une des deux approches n'est pas supérieure à l'autre : simplement, les vues de la société diffèrent pour ces deux approches. Nous justifierons et élaborerons nos recommandations pour chacune d'entre elles.

¹ OPG REVIEW COMITEE, *Transforming Ontario's Power Generation Company*, Avril 2004.

² CANADIAN ENERGY RESEARCH INSTITUTE, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, Août 2004.

Mathématiquement, le modèle aura la forme suivante, où tous les flux seront exprimés en dollar constant, soit en l'année de référence 2005 :

$$VA_{\text{gaz-nucléaire}} = \left[-\sum_{t=0}^2 \frac{I_{g_t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{C_{g_t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{CC_{g_t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{EEG_t}{(1+r)^t} \right] - \left[-\sum_{t=0}^2 \frac{I_{n_t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{C_{n_t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{CGD_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{CC_{n_t}}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{PP_t}{(1+r)^t} \right]$$

Une description des termes et indices suit :

- VA_{gaz-nucléaire} :** Valeur actualisée incrémentale de tous les flux économiques générés par la construction de la centrale au gaz et la réfection de l'unité 2 de Pickering A pour l'année de référence 2005.
- t:** Période à laquelle le coût économique est considéré.
- r:** Taux d'actualisation social en vigueur.
- I_g:** Coûts d'investissements pour la centrale au gaz.
- I_n:** Coûts d'investissements pour la réfection de la centrale nucléaire.
- C_g:** Coûts d'opérations annuels pour la centrale au gaz, contenant les frais d'opération et de main d'œuvre.
- C_n:** Coût d'opération annuels pour le réacteur nucléaire.
- CC_g:** Coûts annuels du gaz naturel nécessaire à la centrale.
- CC_n:** Coûts annuels du combustible nucléaire nécessaire à la centrale ainsi que frais relatifs au transport et à l'entreposage terminal.
- CGD:** Coûts relatifs à la gestion des déchets et au fond de décontamination.
- PP:** Valeur associée au principe de précaution due aux risques nucléaires.
- EEG:** Externalité environnementale relative aux émissions de gaz à effet de serre.

6. Présentation des coûts et externalités

- Coûts

Nous reconnaissons comme coûts économiques toute diminution (par utilisation) des ressources réelles que possèdent la collectivité ontarienne ou bien toute perte de bien-être subie par la société. Pour notre projet, nous nous concentrerons sur le premier aspect, soit l'emploi du stock de ressources nécessaires à la construction ou la réfection de l'une des centrales.

Gaz naturel

Les coûts de la centrale au gaz naturel, pour sa part, se subdivisent en trois catégories. Premièrement, les coûts relatifs à la construction, terrain, équipement et main d'œuvre. Deuxièmement, les coûts annuels d'opérations en main-d'œuvre et frais de gestion. Finalement, le coût du carburant, soit du gaz naturel, nécessaire au fonctionnement de la centrale.

Nucléaire

La centrale nucléaire comporte quatre coûts directs. Premièrement, le coût de réfection en tant que tel : matériaux, main-d'œuvre et capitaux, le tout étalé sur deux années. Deuxièmement, les coûts d'opérations annuels incluant les frais de gestion et la main d'œuvre. Troisièmement, les coûts relatifs à l'entreposage des déchets nucléaires à court terme ainsi qu'une contribution à un fond nécessaire à la décontamination du site après usage. Quatrièmement, les coûts annuels du combustible relativement à l'alimentation de la centrale. Ce dernier coût inclus le prix du carburant nécessaire au fonctionnement de la centrale, mais aussi le coût de transport et d'entreposage de l'uranium usé au lieu terminal de repos³.

³ Site d'enfouissement fédéral des déchets nucléaires dans le bouclier canadien, près de Timmins, dans le nord-ontarien.

- Externalités

Une externalité se caractérise par le fait qu'elle n'a pas été transigée sur un marché. Pour qu'il y ait externalité, il faut qu'un individu ou une entreprise voit son bien-être ou son profit affecté par un événement non-délibéré, dont il n'est pas tributaire. De plus, il ne doit pas y avoir de compensation pour cet impact, sinon le tout est internalisé par cette transaction et on ne parle donc plus d'externalité. Les deux projets proposés concrétisent tous deux une forme d'externalité négative que nous définirons plus loin.

Gaz naturel

Le gaz comporte une externalité principale, soit le dommage environnemental entraîné par l'émission de gaz à effet de serre. La production d'électricité à l'aide de carburants fossiles génère une grande émission de dioxyde de carbone, gaz à effet de serre notoire. Cette production entraîne donc des coûts non internalisés sur la population environnante, dus au réchauffement planétaire qu'elle cause et de ses effets sur la santé des gens.

Nucléaire

De par son fonctionnement, la centrale nucléaire implique deux externalités principales. Premièrement, l'effet induit sur les populations futures par les déchets radioactifs qui devront être entreposés dans le bouclier canadien pour quarante milles ans. Cet aspect est déjà internalisé dans notre analyse par une prime ajoutée au coût du combustible. Deuxièmement, le risque d'incidents nucléaires incontrôlés (explosion, terrorisme, tremblement de terre, etc.) et ses effets dévastateurs sur l'environnement et les gens qui entourent la centrale. Cette perspective sera abordée et justifiée plus loin par le principe de précaution et le degré de protection dont les gens veulent disposer pour se prévenir de telles externalités. Cette méthode est très récente dans la littérature et pousse plus loin l'idée d'externalité en permettant aux gens de révéler jusqu'à quel point cette situation les préoccupe.

7. Détermination du taux d'actualisation

Pour actualiser les différents flux financiers présentés dans notre étude, nous devons déterminer un taux d'actualisation approprié. La présente étude étant une analyse économique, nous avons besoin d'un taux qui reflète le coût du capital pour la société ontarienne et non le coût financier du capital. La différence est énorme puisque que l'objet de notre analyse est le bien-être de la population qui finance le projet (les fonds utilisés ici étant publics) et non la rentabilité financière. Pour tenir compte de ce fait, nous devons déterminer le coût réel du capital d'un point de vue social, soit le coût d'opportunité des fonds publics qui est engendré par l'éviction de projets alternatifs, la perte de consommation et le financement de la dette elle-même. Fait à noter, la production d'électricité en Ontario est sous la gouverne de l'OPG, société d'état semblable à Hydro-Québec. Étant donné son statut publique, nous nous baserons sur l'OPG pour déterminer le coût du capital de la société ontarienne

Nous n'avons pas obtenu de l'OPG, la structure exacte de son financement, donc nous ne sommes pas en mesure de calculer explicitement le taux d'actualisation social en présence. Toutefois, dans le but de quantifier ce taux, nous faisons l'hypothèse que son coût du capital doit être comparable à celui de son voisin québécois, Hydro-Québec. Le taux d'actualisation social actuellement en vigueur chez Hydro-Québec est de 7,222%⁴. Nous allons utiliser cette valeur pour ensuite l'adapter aux réalités du coût de capital pour la société ontarienne. Pour faire cette adaptation, nous allons calculer objectivement la différence dans le coût du capital pour les deux sociétés d'État. Ainsi, nous ferons le ratio pondéré du coût d'emprunt respectif des deux organismes, soit le rendement offert sur les obligations de chaque société d'État pour une échéance donnée. Ensuite nous multiplierons ce ratio par le taux d'actualisation social en vigueur chez Hydro-Québec. Nous pourrions ainsi déterminer un taux d'actualisation social qui tient compte de la réalité ontarienne. Cette approche devrait nous permettre d'obtenir une approximation crédible du coût du capital pour la collectivité ontarienne.

⁴ Source: MARTIN, Fernand, *Évaluation de projets publics*, Guide pour la lecture des ouvrages principaux, ECN-6873, page IX-68.

Pour déterminer ce ratio, nous considérerons les obligations venant à échéance en 2020 pour les deux sociétés d'État, même si l'horizon de notre projet est 2019. Nous utilisons cette hypothèse étant donné que l'une des deux sociétés n'a pas émise d'obligation pour l'année 2019. Par conséquent, il nous semble raisonnable de prendre la valeur obtenue pour 2020. D'autant plus que la centrale sera en opération pratiquement jusqu'en 2020, soit jusqu'au 31 décembre 2019. Les taux de rendement sur les obligations présentement en vigueur sont : 11,00% pour Hydro-Québec et 10,00% pour l'OPG⁵. Le ratio pondéré donne : $1 - [(10,00\% - 11,00\%) / 11,00\%] = 0,9090$. Tel que convenu, nous multiplions ensuite ce ratio par le taux d'actualisation social d'Hydro-Québec, ce qui donne 6,6%. Le taux d'actualisation social que nous utiliserons pour représenter le coût d'opportunité des fonds publics ontariens sera donc de 6,6%.

8. Évaluation, monétisation et actualisation des projets

Centrale à cycle combiné (gaz naturel)

Coûts

i. Coûts de construction.

La construction aura lieu sur deux ans, le coût total prévu étant de 500 M\$⁶. De ce montant, 250 M\$ seront dépensés cette année et 250 M\$ en 2006. Ces estimations comprennent la main-d'œuvre nécessaire à la construction, le site, les équipements et le bâtiment lui-même.

$$250 + \frac{250}{(1+0,066)^1} = 484,53 \text{ millions } \$$$

⁵ Source : Bloomberg, 1^{er} Avril 2005, www.bloomberg.com.

⁶ Source: OPG REVIEW COMITEE, *Transforming Ontario's Power Generation Company*, Avril 2004, V.

ii. Les coûts annuels d'opération

Les coûts annuels d'entretien, de main-d'œuvre et de carburant sont divisés en deux parties, les coûts fixes et les coûts variables. Les premiers sont de 153 800\$⁷ du MWh installé de puissance et les seconds de 3,07\$⁸ du MWh produit. Pour une centrale générant 580 MWh, le premier montant est de 89,2 M\$ et le deuxième de 15,6 M\$, donc au total : 104,8 M\$ annuellement. La centrale sera en opération durant treize ans, procédons à l'actualisation des flux pour cette période.

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{104,8}{(1+0,066)^t} \right] = 896,09 \text{ millions \$}$$

iii. Le coût du carburant

Les prix mondiaux du gaz naturel sont une considération majeure pour les centrales à cycles combinés alimentées au gaz. Sa valeur étant très volatile et en constante hausse, nous devons tenir compte de cette réalité dans notre analyse. Le coût estimé (en dollars constant de 2005) selon le *CERI* est de 6,47\$⁹ du MWh produit. Toujours selon cette étude, le prix du gaz naturel sur les marchés mondiaux subirait une augmentation annuelle réelle de 1,8%¹⁰ pour les vingt prochaines années, soit de 2005 à 2025. Pour la première année de production, le montant nécessaire pour alimenter la centrale en gaz naturel sera de 32,88 M\$. Tel que convenu, pour tenir compte de l'augmentation annuelle réelle du prix du gaz naturel, nous multiplions ce montant par l'augmentation réelle proposée par le *CERI*, soit 1,8%. Nous actualisons les flux sur treize ans.

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{32,88(1+0,018)^t}{(1+0,066)^t} \right] = 390,60 \text{ millions \$}$$

⁷ *CERI, Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, page 12.

⁸ *Ibid.*

⁹ *Ibid.*

¹⁰ *Ibid*, page 31.

Externalité

i. Émission de gaz à effets de serre

Une des particularités des centrales au gaz naturel est l'émission de polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre (SO₂), l'oxyde d'azote (NO_x) et le dioxyde de carbone (CO₂). La combustion de carburant fossile entraîne de lourdes externalités sur l'environnement et la santé des habitants. Les présentes estimations déterminent le coût engendré, par tonne de gaz émis, sur l'environnement et la santé humaine. La valeur proposée pour les dommages occasionnés par le dioxyde de soufre (SO₂) et l'oxyde d'azote (NO_x) varient entre 500\$ et 1000\$¹¹ la tonne. Présentement, étant donné l'incertitude scientifique, *Environnement Canada* utilise la borne minimale pour ses estimations, soit un coût de 500\$ par tonne¹² pour le SO₂ et NO_x : nous utiliserons cette valeur. Le montant utilisée pour le CO₂ représente la valeur des permis de pollution émis récemment par le gouvernement canadien, plus une légère prime pour ses effets sur le réchauffement de la planète. Au total, on estime à 15\$/tonne¹³ les effets du dioxyde de carbone (CO₂) sur l'environnement.

Selon les chiffre retenus, une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel génère pour chaque MWh d'électricité produit 0,5 kg de SO₂ et de NO_x¹⁴ ainsi que 300 kg de CO₂¹⁵. La présente centrale ayant une puissance installée de 580 MWh, sur une base annuelle, cela représente : 2 540,4 tonnes de SO₂ et NO_x et 1 524 240 tonnes de CO₂.

¹¹ KLEIN, Manfred, *Pollution Prevention and Energy Conservation – Valuation of Multiple Benefits*, Septembre 2003, page 6.

¹² Ibid.

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

¹⁵ Ibid.

Maintenant que nous avons les quantités de polluants atmosphériques émis annuellement par la centrale, calculons les dommages induits par ces gaz en les multipliant par leurs équivalents monétaires définis plus haut :

$$2\,540,4 \text{ tonnes} \times 500\$ = 1\,270\,200\$$$

$$1\,524\,240 \text{ tonnes} \times 15\$ = 22\,863\,600\$$$

Nous pouvons conclure que sur une base annuelle, les externalités induites par les gaz à effet de serre produits par la centrale au gaz naturel impliquent un coût de 24,1338 M\$ (dollars constant 2005) sur la société ontarienne. Ces mêmes flux actualisés sur treize ans de production :

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{24,14}{(1+0,066)^t} \right] = 206,36 \text{ millions \$}$$

Réfection de l'Unité 2 de la centrale de Pickering

Coûts :

i. Coûts de construction

Selon les plus récentes évaluations ainsi que l'analyse des coûts nécessaires pour la réfection d'un réacteur jumeau, l'unité 4 de Pickering A, les coûts de réfection contenant la main-d'œuvre, le capital et les matériaux nécessaires totalisent 1 milliard de dollars¹⁶ sur quinze mois. Ainsi : 500 M\$ en 2005 et 500 M\$ en 2006 seraient investis. Le tout actualisé donne :

$$500 + \frac{500}{(1+0,066)^1} = 969,04 \text{ millions \$}$$

ii. Coût annuel d'opération

Cette évaluation contient la somme totale des coûts de maintenance et d'opérations, fournis par le *CERI* pour un réacteur de type CANDU 6. Le coût annuel est estimé à 12,90\$ du MWh¹⁷ produit. La puissance nette de notre réacteur étant de 580 MWh, le montant obtenu est 65 542 230\$ par an. L'horizon étant de treize ans, nous ferons la somme actualisée des flux, soit :

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{65,54}{(1+0,066)^t} \right] = 560,42 \text{ millions \$}$$

¹⁶ Ibid.

¹⁷ *CERI, Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, page 13.

iii. Gestion des déchets et décontamination

L'opération d'une centrale nucléaire génère plusieurs préoccupations quant à ses rebuts et les problèmes qu'ils posent. Premièrement, on doit entreposer les tubes d'uranium usés durant une dizaine d'années pour les stabiliser et les refroidir. Ensuite, on doit prévoir un fonds pour décontaminer la centrale à sa fermeture. Pour les déchets qui seront produits par l'unité 2 de Pickering A, les coûts annuels d'entreposage et de contribution à un fond de décontamination sont estimés à 8 M\$¹⁸. Ces coûts incluent les frais d'entreposage, le coût de la main-d'œuvre et le site en tant que tel. Ce montant ne tient compte que de la gestion à court terme des déchets. Le coût de gestion à long terme des déchets radioactifs sera intégré au coût du combustible dans la section suivante. Si nous actualisons les flux sur treize ans :

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{8,0}{(1+0,066)^t} \right] = 68,41 \text{ millions \$}$$

iv. Coût du combustible

Selon notre approche, le coût du combustible se subdivisera en deux parties distinctes. Premièrement, le coût réel du combustible comprenant ses coûts d'extraction, d'enrichissement et de transport. Deuxièmement, les coûts associés au transport et à l'entreposage à long terme du combustible utilisé au lieu terminal de repos. Ce site est un lieu fédéral protégé où les déchets se stabiliseront durant les quarante mille prochaines années. La première proportion représente de 2,30\$¹⁹ par MWh produits et de 1,45\$²⁰ par MWh produit pour la deuxième. Au total, pour un output de 580 MWh, nous obtenons un coût annuel de : 19 053 000\$. Le tout actualisé sur treize ans :

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{19,05}{(1+0,066)^t} \right] = 162,91 \text{ millions \$}$$

¹⁸ Source : www.opg.com, résultats financiers 2003.

¹⁹ CERl, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, page 12.

²⁰ Ibid.

9. Externalités et risque nucléaire: mise en place du principe de précaution

Définition

Dans le but ultime de l'appliquer à notre cas, définissons le principe de précaution et ses implications. Le principe de précaution est une démarche particulière, apparentée à la gestion du risque, qui est relativement nouvelle pour nous, nord-américains. Son utilisation remonte au milieu des années quarante avec le *Vorsorgeprinzip* allemand, qui introduisait des outils politiques de décisions pour l'évaluation des impacts d'activités humaines irréversibles. Depuis le début des années quatre-vingts, l'émergence des débats sur l'environnement et la nature ont fait du principe de précaution un élément d'actualité. Ce même principe est depuis 1992 un texte de loi reconnu à l'ONU. Il est aussi inclus dans le traité de Maastricht et la législation française. La loi Barnier, qui fût votée le 2 février 1995, est la définition retenue par la France pour le principe de précaution, cette dernière résume bien l'esprit du principe de précaution :

« L'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable. »

Toutefois, il n'existe pas de consensus international sur une définition formelle du principe de précaution et tous les gouvernements ne l'interprètent pas de la même façon. Pour cette raison, nous utiliserons un document de travail du gouvernement du Canada : *Une perspective canadienne sur l'approche/principe de précaution*²¹. Avant d'en exposer les grandes lignes, nous aimerions donner quelques précisions au sujet du principe de précaution. À priori, il est essentiel de bien distinguer prévention et précaution. La prévention fait référence à un danger où les risques et les conséquences sont quantifiés et bien connus. Par contre, lorsque le danger n'est que potentiel et que la construction des risques et de leurs impacts sont hypothétiques ou mal connus, nous sommes en présence

²¹ GOUVERNEMENT DU CANADA, *Une perspective canadienne sur l'approche/principe de précaution* : Document de consultation, 2001, http://www.ec.gc.ca/econom/discussion_f.htm.

de précaution. La distinction tient à l'évaluation que les gens peuvent faire du danger. Selon la théorie économique, lorsque les gens possèdent toute l'information nécessaire lors d'une prise de décision, ce choix est nécessairement optimal et le niveau de prévention demandé sera aussi optimal. Toutefois, si l'on ne possède qu'une partie de l'information ou même une structure d'informations controversées, mais qu'une décision irréversible s'impose, il est fort probable que nous faisons un choix précautionneux et que nous portions une attention particulière aux événements irréversibles et dommageables. Dans ce cas précis où l'information n'est que fragmentaire et qu'il est impossible d'évaluer objectivement la décision optimale, cette attitude de prévoyance face à l'incertitude représente ce que nous considérons la précaution. Il ne faut pas croire non plus que le but visé par le principe de précaution est l'éviction de tout danger et la recherche du risque zéro : l'idée est tout simplement de caractériser le désir de précaution des gens dans une situation où l'issue est objectivement incertaine. Nous faisons par conséquent l'hypothèse que l'énergie nucléaire fait parti de ces cas incertains et irréversibles. Les connaissances actuelles ne permettant pas de disposer d'une relation indiscutable entre ces risques potentiellement apocalyptiques et l'utilisation du nucléaire, des mesures de précaution en limitant les dangers sont donc légitimes.

Regardons à présent les grandes lignes du document de travail du gouvernement du Canada : *Une perspective canadienne sur l'approche/principe de précaution*²². Ces six grands principes généraux d'application nous fournissent le cadre légitime de notre application du principe de précaution.

1. L'approche de précaution est un outil décisionnel légitime et original pour gérer les risques.

2. On tient pour légitime que les décisions soient guidées par le niveau de protection contre les risques dont veut se doter la société.

3. Des données scientifiques solides et l'évaluation de ces données doivent sous-tendre l'application de l'approche de précaution, particulièrement en ce qui a trait à, premièrement, la décision d'agir ou non (p. ex. de mettre en œuvre des mesures de

²² Ibid, page 14.

précaution ou de ne pas le faire) et, deuxièmement, aux mesures à appliquer une fois la décision prise.

4. La preuve scientifique devrait être établie en fonction du niveau de protection voulu. De plus, la responsabilité de produire l'information (fardeau de la preuve) peut être déléguée. On reconnaît que la preuve scientifique et la responsabilité de la produire peuvent varier avec l'évolution des connaissances.

5. Il devrait y avoir des mécanismes pour réévaluer le fondement des décisions et permettre la tenue d'autres consultations dans un contexte de transparence.

6. Il convient d'accroître la transparence, la responsabilisation et la participation du public.

À la lumière de ces principes généraux, trois implications ressortent particulièrement et seront utilisées dans notre application du principe de précaution. Premièrement, la précaution nécessaire est directement proportionnelle à la protection désirée par la société. Deuxièmement, la protection désirée par la population est tributaire de la perception et des désirs des individus formant cette collectivité. Troisièmement, même si le principe de précaution est caractérisé par une structure d'informations incomplètes et controversées, le recours à des données scientifiques solides est légitime. Ces trois implications nous offre la possibilité de quantifier ce désir de précaution, mais aussi nous offre la légitimité d'y recourir pour prendre une décision quand la société le requiert :

« L'application de l'approche de précaution dans le processus décisionnel portant sur les risques est également entravée par la dynamique inhérente à la science. Même si l'information scientifique n'est pas concluante, il faudra malgré tout prendre les décisions qui s'imposent pour répondre aux attentes de la société concernant la gestion des risques et le maintien du niveau de vie. »²³

La dernière remarque que nous ferons tient à la subtilité de l'horizon temporel et à l'application du principe de précaution. Dans la littérature, la façon la plus usuelle d'aborder le principe de précaution est de considérer les événements sur un horizon

²³ Ibid, page 15.

temporel assez long. Ceci permet principalement l'apprentissage, mais aussi la mise à jour de nos compréhensions des dangers et de leurs impacts. Par contre, notre cas est caractérisé par un échéancier très court et une prise de décision irréversible. Le gouvernement ontarien doit prendre une décision finale d'ici six mois et par conséquent, il n'y a pas vraiment place à apprentissage. Notre application du principe de précaution est donc aussi caractérisé par cette rigidité temporelle.

Justification

Une des particularités du nucléaire est le danger qu'il représente pour la vie humaine advenant une catastrophe. L'exposition massive aux radiations émises par le processus de fusion peut entraîner des externalités considérables. L'exemple le plus patent est l'explosion d'un des réacteurs de la centrale de Tchernobyl, qui a entraîné des milliers de morts et a eu des conséquences environnementales sans précédent. Les risques les plus souvent cités sont la possibilité de défaillance interne de la centrale, d'attaques terroristes et de tremblements de terre. Plusieurs manifestations, particulièrement en Ontario, nous laissent croire que les gens ont peur de l'énergie nucléaire au point qu'ils seraient prêts à déboursier pour éviter d'y recourir. Nous n'avons qu'à penser aux manifestations de 1997 et 1999 en Ontario, qui avaient attiré nombre de gens, où cent cinquante mille tracts avaient été distribués pour la fermeture finale des centrales de Pickering et Bruce. Plus près de nous, souvenons-nous des réactions et des manifestations qui ont eu lieu à Montréal et à Toronto en l'an 2000 lorsque l'Ontario avait décidé d'importer moins d'un demi kilo de plutonium (Mox) de la Russie pour le tester dans ses centrales nucléaires. La réaction de la population avait été telle que le gouvernement fédéral de l'époque avait dû s'imposer pour faire annuler ce projet et le cargo transportant le plutonium Russe n'avait jamais pu accoster au port. Plus récemment, le *Toronto Star*, rapportait dans son édition du 22 août 2003 qu'un immigrant illégal canadien, qui prenait actuellement des leçons de pilotage, prévoyait attaquer, pour la solde d'une organisation intégriste musulmane, un réacteur nucléaire en Ontario. Cet épisode avait semé la terreur là-bas et avait alimenté le débat déjà houleux sur la sécurité des installations nucléaires.

Rajoutons à cela toutes les dissensions entre scientifiques quant aux impacts réels d'un incident nucléaire sur la santé humaine et l'environnement. Toutes ces conjectures nous portent donc à croire qu'il y a un désir réel pour l'application du principe de précaution dans la population ontarienne.

Tel qu'énoncé, la présente section a pour objectif ultime d'accorder une valeur aux risques induits par la production d'électricité à partir du nucléaire. Plus spécifiquement, nous ne tenterons pas de quantifier objectivement le risque et ses retombées, mais bien de l'évaluer selon le désir de précaution des gens qui y sont soumis avec l'aide du principe de précaution. Le recours à cette méthode est justifiée par le document du gouvernement du Canada :

«... le processus décisionnel doit définir les coûts et les avantages possibles clairement et rapidement et discerner quels risques le public est disposé à accepter en s'appuyant sur une base scientifique solide et raisonnable, bien qu'incomplète. »²⁴

Un autre aspect primordial de notre analyse est l'importance que nous voulons laisser au niveau de protection désiré par la population. Comme nous l'avons souligné dans notre définition, l'énergie nucléaire fait partie de ces cas où la structure d'informations incomplètes amène les gens à considérer avec emphase et précaution les scénarios les plus dramatiques. C'est cette capacité de laisser les gens déterminer le niveau de précaution qu'ils désirent face à ces dangers hypothétiques qui fait toute la finesse de notre approche. Cette possibilité de quantifier le niveau de protection désiré par le principe de précaution sera formalisé dans les pages qui suivent. Fait à remarquer, c'est le comportement de chaque individu formant la collectivité ontarienne qui va déterminer la valeur du principe de précaution. Cette méthode est d'autant plus valable que selon le document de travail du gouvernement du Canada, la participation du public est nécessaire pour bien comprendre l'interprétation des risques :

²⁴ Ibid, page 16.

« Dans les situations d'incertitude importante (sur l'ampleur du préjudice, les chances qu'il se concrétise ou la manière la plus efficace de le contrer, où interviennent des données scientifiques complexes), il faut qu'il y ait participation du public pour bien comprendre les interprétations que l'on donne à l'incertitude et aux risques. »²⁵

Présentation de la méthode

Tel que spécifié, notre méthode a pour but ultime d'attribuer une valeur, un consentement à payer, de la part des gens qui sont soumis aux risques nucléaires pour un niveau de précaution désiré. Pour y parvenir, nous tentons de trouver une méthode qui évalue objectivement le désir de précaution des gens, tout en conservant une attitude averse au risque²⁶. La littérature sur le principe de précaution étant relativement limitée, nous avons adapté une méthode ayant fait ses preuves dans des domaines connexes. Nous voulions surtout que cette méthode tienne compte du comportement normal des agents en situation de précaution, ce qui les amènent à considérer avec plus d'importance (plus de poids) les événements ayant les conséquences les plus dommageables.

Pour en arriver à attribuer une valeur au principe de précaution, nous devons quantifier deux choses. Premièrement, la proportion de richesse (M_{Aj}) que chaque individu est prêt à payer, par précaution, pour se soustraire aux risques induits par l'énergie nucléaire. Deuxièmement, déterminer la richesse statistique qui serait perdue pour chaque individu (W_j) s'il advenait un incident nucléaire. Lorsque que nous aurons explicitement quantifié ces deux valeurs, il ne restera qu'à les multiplier par la population soumise à nos scénarios (N_j). Nous obtiendrons ainsi la valeur totale du principe de précaution pour notre projet. Mathématiquement, la somme se présente ainsi :

²⁵ Ibid, page 16.

²⁶ Nous considérons la société ontarienne comme généralement averse au risque.

$$\text{Valeur principe de précaution} = \sum_{j=1}^m [(M_{Aj})(W_j)](N_j) \quad \text{où } j = 1, \dots, m$$

Pour en arriver à quantifier les deux valeurs exposées précédemment et d'ultimement fixer un montant au principe de précaution pour notre cas, nous allons procéder en cinq étapes. Dans un premier temps, nous déterminerons la proportion de richesse que les gens sont prêts à payer par précaution (M_{Aj}), par l'intermédiaire d'une loterie. Deuxièmement, nous définirons les divers paramètres et données sur la société ontarienne nécessaires à notre projet. Troisièmement, nous mettrons en application notre loterie avec les paramètres déterminés précédemment pour calculer objectivement les M_{Aj} . Quatrièmement, nous calculerons objectivement la perte de richesse statistique (W_j) advenant un accident nucléaire, pour tous les individus. Finalement, nous agrégerons nos résultats pour mesurer la valeur du principe de précaution.

I Détermination de la proportion de richesse que les individus sont prêt à payer par précaution

Pour en arriver à déterminer la proportion de richesse que les gens sont prêt à payer par précaution (M_{Aj}), nous avons besoin d'une méthode qui évaluerait objectivement le désir de précaution des gens. La formulation retenue, intitulée EURDP²⁷, intègre les derniers acquis de la théorie du risque. Essentiellement, c'est une généralisation du critère très connu de « l'utilité espérée » de Von Neumann et Morgenstern²⁸. Souvent appelée « utilité anticipée », l'EURDP permet aux agents de considérer toutes les alternatives en même temps et de mettre plus de poids sur certaines d'entre elles, ce que ne permet pas « l'utilité espérée » traditionnelle, qui compare toutes les alternatives séparément et équitablement. Comme nous l'avons vu, dans un contexte d'incertitude, notamment la production d'énergie par le nucléaire, le public surestime généralement la probabilité d'occurrence d'un événement rare et il considère que la

²⁷ EURDP : Expected Utility with Rank Dependent Probability.

²⁸ Critère de l'utilité espérée, Von Neumann et Morgenstern 1944.

probabilité d'un accident nucléaire est supérieure à celle énoncée par les experts²⁹. L'EURDP nous permettra donc de caractériser ce comportement et d'évaluer le niveau de protection désiré par la société ontarienne, en permettant aux gens de comparer simultanément tous les états du monde³⁰ et de donner plus de poids aux événements les plus dommageables. La présente méthode est bien documentée et elle a fait ses preuves dans plusieurs études exhaustives³¹.

La méthode fonctionne ainsi : elle place tous les individus devant une loterie ayant des probabilités et des conséquences définies par les meilleures données scientifiques disponibles. La particularité de l'EURDP, c'est qu'elle somme toutes les probabilités de tous les états du monde dans un ordre donné et accorde un poids relatif à chaque état du monde par une fonction de transformation. Par l'intermédiaire de cette fonction de transformation, le poids des états du monde moins probables mais plus dommageables (décès ou cancers) sont surestimés délibérément comparativement aux états du monde plus probables mais moins dommageables (aucune séquelle sur la santé). Ce mécanisme va donc permettre aux gens de prendre une décision optimale sur le niveau de protection qu'ils désirent, même s'ils ne possèdent qu'une structure d'informations partielles. Intuitivement, cette capacité à mettre plus d'importance aux effets négatifs et à se rapprocher des perceptions des gens ressemble étrangement à l'idée que l'on se fait de la prudence et de la précaution.

La modélisation de l'EURDP à première vue semble lourde, mais dans les faits elle est très semblable à « l'utilité espérée » habituelle qu'on retrouve usuellement sous

cette forme :
$$E(U) = \sum_{i=1}^n U(X_i) p_i$$

Essentiellement, ce qui va changer entre « l'utilité espérée » et « l'utilité anticipée » c'est la forme que l'on va attribuer aux probabilités (p_i). Au lieu de prendre

²⁹ EECKHOUDT, L., *Risk aversion and the external cost of a nuclear accident*, page 110.

³⁰ Nous considérons comme états du monde, tous les impacts probables sur la santé humaine induit par notre projet.

³¹ Ascari, S. et Bernasconi, M. 1998; Bargiacchi, R. 2000.

une probabilité unique, nous allons consolider toutes les probabilités selon un ordre défini. Pour la consolidation des probabilités et l'attribution des différents poids relatifs, soit plus de poids aux états du monde dommageables et moins aux états du monde peu dommageables, nous utiliserons une fonction de transformation (Ψ). Chaque état du monde (X_i) représente une perte de richesse associée à un événement relié à notre centrale nucléaire, par exemple un cancer. A priori, on doit donner un ordre de préférence aux différents états du monde (X_i), soit du pire au meilleur, comme ceci :

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$$

L'ordre de préférence étant défini, regardons quelle forme aura notre « utilité anticipée » :

$$E(U) = \sum_{i=1}^n U(X_i) \left[\psi \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) - \psi \left(\sum_{i=1}^{n-1} p_i \right) \right] \quad \text{où } i = 1, \dots, n$$

Tel qu'expliqué précédemment la forme est très semblable à celle de « l'utilité espérée », seulement les probabilités simples (p_i) sont transformées par une pondération particulière contenue entre les crochets. On peut retrouver dans la formule précédente trois éléments : premièrement, la forme EURDP, c'est-à-dire l'espérance de l'utilité transformée par la fonction (Ψ). Deuxièmement, cette même fonction de transformation des probabilités (Ψ), qui nous permet de simuler la précaution en attribuant plus de poids aux événements dommageables. Troisièmement, une fonction d'utilité individuelle $U(X_i)$, qui sera définie un peu plus loin.

La fonction de transformation (Ψ) est capitale pour notre analyse, car c'est elle qui permet de donner plus de poids aux événements dommageables et moins aux événements peu ou pas dommageables. Celle que nous utiliserons est largement documentée dans la littérature économique, plus précisément dans la branche qui traite

des comportements cognitifs. Nous ferons référence à la fonction de Tversky.³² À vrai dire, elle permettra deux choses : dans un premier temps, sa forme traduit la précaution dans un contexte d'incertitude. Puis, elle permet de prévoir comment les individus réagissent quand on passe d'un état de certitude à un état d'incertitude, comme dans l'éventualité d'un incident nucléaire. Elle se présente sous cette forme :

$$\psi(P) = \frac{1 - P^\gamma}{(P^\gamma + (1 - P)^\gamma)^\gamma} \quad \text{où} \quad P = \sum_{i=1}^n p_i$$

Le paramètre qui déterminera le degré de précaution des gens dans la fonction de transformation de Tversky est la constante γ . La fonction de Tversky a été soumise à diverses analyses empiriques et économétriques relativement aux comportements des agents dans des situations nécessitant de la précaution. Les deux principaux travaux expérimentaux³³ à ce sujet concluent à une valeur de 0.56 pour le coefficient γ . Nous utiliserons donc cette valeur au cours de notre analyse.

Nous considérons ici les gens formant la société ontarienne comme averses au risque,³⁴ cette hypothèse étant largement répandue et acceptée dans la littérature. Nous utiliserons donc une fonction d'utilité fort simple pour représenter cette relation risque-averse. L'utilité que retire les individus d'une situation provient de la richesse finale qu'ils possèdent. Voilà la fonction d'utilité que nous utiliserons :

$$U = \frac{1 - \beta}{\beta} (W(1 - X_i))^\beta \quad \text{où} \quad \beta < 1$$

La particularité de cette fonction est qu'elle concrétise une aversion au risque positive et décroissante. Cette fonction est largement documentée et a été utilisée dans les deux travaux qui inspirent notre analyse, soit Eeckhoudt, L. 2000 et Markandya, A. 1998. Par souci de simplicité, elle ne fait référence qu'à la perte de richesse (X_i) induite par un

³² Tversky et Kahneman 1979.

³³ Camarero et Ho, 1994; Hey et Orme 1994.

³⁴ La littérature économique accepte généralement le fait que les individus constituant la société sont averses au risque. Voir : Arrow K. (1970), Friend I. et Blume M. (1975)

état du monde et à une richesse initiale (W). Le coefficient β , pour sa part, est un coefficient d'aversion pour le risque que nous définirons un peu plus loin.

Dans le but d'intégrer une aversion au risque nucléaire pour les citoyens touchés, la valeur du coefficient d'aversion au risque β doit être défini. Pour la fonction d'utilité utilisée, les valeurs généralement admises pour β varient entre 0 et -1 (Friend and Blume, 1975 ; Szpiro, 1986). Selon Eeckhoudt,³⁵ un coefficient inférieur à -1.5 donnerait des valeurs beaucoup trop grandes, étant donné la croissance géométrique de la fonction d'utilité. Nous allons donc utiliser une des deux valeurs retenues dans les travaux d'Eeckhoudt, soit -0.5 . Dans ces travaux, Eeckhoudt a utilisé -0.5 et -1 . Dans son cas, il voulait s'approprier la totalité des comportements prudents par une fonction d'utilité largement aversive au risque. Étant donné que notre analyse n'est pas uniquement basé sur l'aversion au risque, mais aussi sur le désir de précaution des gens, il semble sage de prendre la valeur intermédiaire pour ne pas saturer nos résultats.

L'objectif de ce modèle est de déterminer la proportion maximale que chaque individu est prêt à payer (WTP) pour éviter la perte subie par la loterie (l'espérance anticipée d'un incident nucléaire). Cette proportion, que nous appellerons M_A , représente la valeur de la précaution que désirent les gens. Ici, nous laissons tomber l'indice « j » pour M_{Aj} car nous calculons cette valeur pour les « n » individus dans chaque zone, ce qui va simplifier notre notation sans aucun impact sur nos calculs. Pour trouver M_A , nous réorganisons la formule de notre loterie pour que sa valeur résiduelle soit nulle. La personne est donc indifférente entre la loterie et l'utilité qu'elle retire en payant pour la précaution. De cette façon, elle révèle la proportion de richesse qu'elle serait prête à payer pour avoir accès à la précaution :

$$E[U] = \frac{1-\beta}{\beta} (W(1-M_A))^\beta$$

³⁵ EECKHOUDT, L., *Risk aversion and the external cost of a nuclear accident*, page 113.

La formulation qui suit va déterminer le M_A précis où les gens sont indifférents entre l'utilité obtenue en payant pour la précaution *versus* les retombées de notre « loterie nucléaire ». Par cette condition d'équilibre nous sommes donc en mesure de déterminer numériquement la proportion de richesse que les gens sont prêts à payer pour avoir accès à la précaution (M_A). L'égalité est la suivante :

$$\sum_{i=1}^n \frac{1-\beta}{\beta} (W(1-X_i))^\beta \left[\psi \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) - \psi \left(\sum_{i=1}^{n-1} p_i \right) \right] = \frac{1-\beta}{\beta} (W(1-M_A))^\beta \quad \text{où } i = 1, \dots, n$$

Pour trouver objectivement M_A , il ne reste plus qu'à réorganiser le tout et on obtient :

$$M_A = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (1-X_i)^\beta \left(\psi \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) - \psi \left(\sum_{i=1}^{n-1} p_i \right) \right) \right]^{1/\beta} \quad \text{où } i = 1, \dots, n$$

M_A représente par conséquent la proportion maximale de la richesse individuelle que les gens sont prêts à payer pour se soustraire par précaution aux risques induits par le nucléaire. Ce qu'il y a à retenir, c'est que tous les M_A seront évalués selon différents paramètres pour chaque individu. C'est donc cette méthode qui nous permettra d'évaluer le niveau de précaution désiré par chaque individu. Nous devons à présent introduire les paramètres réels de notre projet de centrale dans notre formulation présentée ci-haut pour obtenir des résultats tangibles.

II Détermination des scénarios et des paramètres

Pour mettre la méthode décrite précédemment en pratique, il faut à présent déterminer des paramètres concrets applicables à notre cas. Tout d'abord, nous devons déterminer le risque d'explosion et de rejet du cœur radioactif dans l'environnement. Il n'existe pas de consensus sur les probabilités absolues de rejet nucléaire dans l'environnement. Toutefois, l'AECL, constructeur de notre réacteur d'étude, le CANDU

6, estime la probabilité à 4,6 E-6 explosion par réacteur/année. Donc un accident sévère non contrôlé tous les 4 600 000 ans par réacteur. Cette évaluation ne tient toutefois pas compte des erreurs humaines, des risques de feu, de tremblements de terres ou d'attaques terroristes. Une étude indépendante, réalisée au profit d'*Hydro-Ontario*³⁶ dans les années 90, avait évalué la probabilité à 1,0 E-4 réacteur/année. Cette étude a toutefois été contestée pour ses hypothèses trop pessimistes. Nous utiliserons, pour les fins de ce travail, la valeur utilisée par le bureau nucléaire fédéral américain et le conseil nucléaire européen, qui tient compte de tous les risques évoqués ci-haut : 1,0 E-5, soit un incident par 100 000 réacteur/année. Dans le cas de la réfection de Pickering, même si la centrale est la plus grosse au monde avec huit réacteurs sous le même toit, notre projet n'implique que la restauration d'un seul réacteur ; dans ce cas, la probabilité d'incident nucléaire que nous utiliserons est d'un incident tous les cent mille ans.

S'il y avait un incident incontrôlé, il n'est pas nécessaire de prévoir un scénario apocalyptique comme celui de Tchernobyl. Essentiellement, notre modèle suggère qu'un incident incontrôlé peut se produire avec une probabilité 1,0 E-5 réacteur/année. Ceci n'implique toutefois pas une brèche massive dans le sarcophage du réacteur. Pour refléter cela, nous diviserons notre probabilité d'incident en deux catégories. L'incident plus mineur de catégorie ST21, soit un rejet de 1% du cœur radioactif dans l'environnement et de catégorie ST2, un rejet de 10% du cœur dans l'environnement. La catégorie ST2 aurait des retombées nettement plus graves, sensiblement identiques à l'explosion de Tchernobyl. Le CANDU 6 étant conçu pour résister le plus possible aux fuites radioactives, s'il y avait fission du cœur, la probabilité d'un rejet de type ST2, plus rare, est de 19% et ST21, est de 81%³⁷.

Si la probabilité d'incident ne fait pas l'unanimité, les impacts d'un tel événement sur la santé humaine sont encore plus mitigés. Comme nous l'avons expliqué préalablement, cette imprécision sur les résultats réels d'un incident sont intrinsèques au principe de précaution. Dans le cadre de notre analyse, nous avons choisi de baser les

³⁶ ALLEN, P.J., 1990.

³⁷ COMMISSION EUROPÉENNE, ExternE, *Externality of Energy, Volume 5: Nuclear*, 1995, page 204.

impacts d'un accident sur une étude très exhaustive de la communauté européenne: *ExternE*. L'incertitude quant aux impacts sur la vie humaine d'un incident est immense : l'orientation du vent, son amplitude, l'humidité relative et la présence d'eau en déterminent les conséquences et les retombées. Par exemple, un vent sud soutenu pousserait le nuage radioactif vers le nord ontarien en minimisant les dommages, mais un vent nord-ouest rayerait Toronto de la carte. Nos scénarios sont donc uniformément pondérés pour toutes les possibilités de dispersion. Ces mêmes probabilités sont disponibles dans le tableau 1 et sont exprimées pour chaque individu pour trois zones distinctes d'exposition, que nous définirons ainsi : premièrement, la probabilité de décès induite par un accident nucléaire. Deuxièmement, la probabilité d'avoir des séquelles graves (cancer ou maladie génétique). Troisièmement, la possibilité que l'incident n'ait aucun impact significatif direct sur la santé de la personne.

Il faut bien comprendre que notre analyse porte sur la population de l'Ontario, par souci de simplicité nous ne ferons référence qu'à ses citoyens. Évidemment, un tel incident aurait des impacts sur la majeure partie des populations nord-américaines, notamment tout le bassin des grands lacs, mais nous ne considérerons ici que l'Ontario. Trois zones d'expositions ont été établies, chaque zone est impactée différemment et les probabilités de décès et de séquelles sur la santé y sont différentes. La première (N_1) est la zone à haut risque qui sera évacuée, soit le rayon de 0 à 24 kilomètres autour de la centrale. La deuxième (N_2) est aussi à haut risque mais ne sera pas évacuée, notamment parce qu'elle contient plus de la moitié de la population de l'Ontario ainsi que la ville de Toronto ; cette zone contient tout le rayon de 24 à 100 kilomètres. Finalement, la partie régionale (N_3) de 100 à 1000 kilomètres de rayon, qui ne sera pas évacuée et qui, par simplification, représente le reste de la population de l'Ontario. La dimension des rayons que nous utilisons sont les mêmes que ceux proposés dans les études d'*Eeckhoudt 2000* et *ExternE*.

La population touchée par l'éventuel incident pour les trois zones a été calculée à l'aide des prévisions démographiques faites par le ministère ontarien des finances.³⁸ Pour

³⁸ *Ontario Population Projections 2004-2030*, Février 2005, Ministère des Finances.

en arriver à déterminer la population impliquée dans chacune des trois zones, nous avons fait la somme des populations contenues dans les quarante-neuf régions administratives de l'Ontario, touchées ou non par le sinistre. Nous avons utilisé les projections pour l'année 2004, étant donné que seule cette dernière donnait une évaluation exhaustive de la population par région et par ville. La somme obtenue pour le rayon de 0 à 24 kilomètres (N_1) est d'environ 850 000 personnes. Le rayon de 24 à 100 kilomètres (N_2) contient la plupart des grandes villes ontariennes comme Toronto, York, Hamilton et Peterborough, et dénombre 7 685 000 personnes. Ne nous reste plus qu'à déterminer la population pour la zone de 100 à 1000 kilomètres (N_3) : ce rayon contient tout le reste du territoire de l'Ontario sauf l'extrême nord-ouest, soit la partie supérieure du district de Kenora. Ce district est à peu près inhabité et ne compte aucune ville de plus de mille habitants, aucune route n'y mène directement. Par conséquent, nous faisons l'hypothèse d'inclure cette région, ce qui de toute façon n'aura pas d'impacts significatifs sur nos résultats. Nous allons donc soustraire la population des deux autres zones à la population totale de l'Ontario pour 2004 (12 392 700 personnes), ce qui nous laisse une population de 3 857 700 personnes pour la zone de 100 à 1000 kilomètres (N_3).

Voici les différentes probabilités de décès et de cancers auxquels font face les citoyens et les probabilités pondérées par le risque d'incident de type ST2 et ST21 qui y sont associées. Nous aurons besoin de ces dernières probabilités pour en arriver à déterminer tous les états du monde relatifs à notre cas.

| Tableau 1 : Estimation des probabilités individuelles de décès et de cancer suite à un incident nucléaire | | | |
|--|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Zones affectées | Évacuation N_1 0-24km | Non-évacuation N_2 24-100 km | Non-évacuation N_3 100-1000 km |
| ST21 Rejet de 1% du cœur du réacteur | | | |
| Probabilité individuelle de décès | 2,5 E-04 | 2,5 E-04 | 5,6 E-05 |
| Probabilité individuelle de cancer | 4,9 E-04 | 4,9 E-04 | 1,1 E-04 |
| Probabilité d'aucune séquelle | 9,9926 E-01 | 9,9926 E-01 | 9,9983 E-01 |
| ST2 Rejet de 10% du cœur du réacteur | | | |
| Probabilité individuelle de décès | 1,58 E-03 | 1,58 E-03 | 2,57 E-04 |
| Probabilité individuelle de cancer | 3,55 E-03 | 3,55 E-03 | 5,15 E-04 |
| Probabilité d'aucune séquelle | 9,9487 E-01 | 9,9487 E-01 | 9,99228 E-01 |

Nous possédons maintenant tout le nécessaire pour énoncer les différents états du monde inhérents à notre projet de réfection de centrale. Ces états du monde sont caractérisés par une perte de richesse individuelle (X_i) induite par tous les événements susceptibles d'accompagner la réfection de la centrale. Nous considérons quatre grands types d'événements : premièrement, le décès d'une personne en relation avec un incident nucléaire. Deuxièmement, des maladies ou cancers causés par l'incident. Troisièmement, la personne n'a aucune séquelle physique malgré l'incident, mais sa vie est toutefois affectée par le sinistre. Quatrièmement, l'absence total d'incident nucléaire. Ces quatre événements peuvent survenir à l'intérieur de deux scénarios ayant des conséquences et des impacts très différents (ST2 et ST21). Pour tenir compte de cela, nous considérons ces deux scénarios simultanément, il y a donc un total de huit états du monde possibles pour chacune des trois zones. Les pertes associées à ces états du monde sont illustrées ci-bas sous la forme de pourcentage et représentent donc la proportion de richesse individuelle perdue. Le fait de perdre moins de 100% de sa richesse suite à un décès statistique peut sembler contre-intuitif, mais le tout s'explique par le délai qui existe entre l'exposition aux radiations et la mort. Donc, même si elle est vouée à une mort certaine, la personne peut disposer d'une partie de sa richesse pendant un court laps de temps. Comme stipulé, chaque zone est soumise à huit états du monde différents, soit ($X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$). Comme chaque zone est considérée indépendamment, les scénarios ne sont pas identiques, même si nous utilisons la même notation.

| Tableau 2 : | | Proportion de richesse perdue pour chaque état du monde | |
|--|-----------------------------------|---|---------------|
| Groupe | État du monde | % de perte de richesse perdue (X_i) | |
| | | ST2 | ST21 |
| Local et re-localisé (0-24 km) $N_1 = 850\ 000$ personnes | Re localisé + décès | $X_1 : 97,77$ | $X_2 : 97,77$ |
| | Re localisé + cancer | $X_3 : 9,75$ | $X_4 : 9,75$ |
| | Re localisé + aucune séquelle | $X_5 : 0,39$ | $X_6 : 0,39$ |
| | Aucun incident | $X_7 : 0,0$ | $X_8 : 0,0$ |
| Local non re-localisé (24-100 km) $N_2 = 7\ 685\ 000$ personnes | Non re localisé + décès | $X_1 : 97,77$ | $X_2 : 97,39$ |
| | Non re localisé + cancer | $X_3 : 9,74$ | $X_4 : 9,38$ |
| | Non re localisé + aucune séquelle | $X_5 : 0,39$ | $X_6 : 0,02$ |
| | Aucun incident | $X_7 : 0,0$ | $X_8 : 0,0$ |
| Régional non re-localisé (100-1000 km) $N_3 = 3\ 857\ 700$ personnes | Non re localisé + décès | $X_1 : 97,39$ | $X_2 : 97,38$ |
| | Non re localisé + cancer | $X_3 : 9,38$ | $X_4 : 9,37$ |
| | Non re localisé + aucune séquelle | $X_5 : 0,02$ | $X_6 : 0,004$ |
| | Aucun incident | $X_7 : 0,0$ | $X_8 : 0,0$ |

Dans le tableau 3 sont rapportées toutes les probabilités (p_i) associées à tous les états du monde (X_i) énoncés précédemment et répertoriées par région.

| Tableau 3 : Probabilités relatives à chaque état du monde | | | |
|--|-------------------------------------|--|--|
| Zones affectées | Évacuation N ₁ 0-24km | Non-évacuation N ₂ 24-100 km | Non-évacuation N ₃ 100-1000 km |
| ST21 Rejet de 1% du cœur du réacteur (81% des cas) | | | |
| Probabilité d'accident de type ST21 | 8,1 E-06 | | |
| Probabilité individuelle de décès (p_2) | 2,025 E-09 | 2,025 E-09 | 4,536 E-10 |
| Probabilité individuelle de cancer (p_4) | 3,969 E-09 | 3,969 E-09 | 8,910 E-10 |
| Probabilité individuelle d'aucune séquelle(p_6) | 8,095 E-06 | 8,095 E-06 | 8,0975 E-06 |
| Probabilité aucun incident (p_8) | 0,9999919 E-01 | 0,9999919 E-01 | 9,999919 E-01 |
| ST2 Rejet de 10% du cœur du réacteur (19% des cas) | | | |
| Probabilité d'accident de type ST2 | 1,9 E-06 | | |
| Probabilité individuelle de décès (p_1) | 3,002 E-09 | 3,002 E-09 | 4,883 E-10 |
| Probabilité individuelle de cancer (p_3) | 6,745 E-09 | 6,745 E-09 | 9,785 E-10 |
| Probabilité individuelle d'aucune séquelle(p_5) | 1,89025 E-06 | 1,89025 E-06 | 1,8985 E-06 |
| Probabilité aucun incident (p_7) | 9,9999819 E-01 | 9,9999819 E-01 | 9,999981 E-01 |

III Présentation des résultats de la loterie

Ayant défini la forme mathématique de notre loterie ainsi que les paramètres nécessaires à son application, il ne reste plus qu'à programmer le tout. Après programmation, la fraction de richesse que chaque citoyen est prêt à payer pour s'assurer une certaine précaution (M_{A_j}) est rapportée dans le tableau 4. Les résultats sont présentés pour les trois zones selon le coefficient d'aversion au risque déterminé plus tôt. Ces différentes données ont été obtenues à l'aide du modèle présenté dans la section I et ont été calculées informatiquement pour plus de précision. La proportion de richesse que les gens sont prêts à payer pour avoir accès à la précaution est donnée dans le tableau 4 en pourcentage pour les trois zones. Par exemple, quelqu'un à proximité de la centrale, habitant la première des trois zones, est prêt à payer annuellement 0,047% d'une éventuelle perte de richesse engendrée par un incident nucléaire.

| Tableau 4 : Proportion de richesse que les gens sont prêts à payer | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Zones affectées | Évacuation 0-24km | Non-évacuation 24-100 km | Non-évacuation 100-1000 km |
| | M_{A1} | M_{A2} | M_{A3} |
| Proportion de la richesse (M_{Ai}) qu'ils sont prêts à payer en (%) | 0,04726905 | 0,04560946 | 0,0167486 |

Les valeurs précédentes sont donc la proportion de richesse que les gens sont disposés à payer par précaution pour éviter les ravages induits par un incident nucléaire. Ce montant représente la proportion individuelle de précaution demandée par la société ontarienne pour les trois zones définies préalablement. Sachant cela, il nous faut à présent déterminer la richesse qui serait perdue advenant un incident nucléaire.

IV Évaluation de la perte de richesse

Il est à présent nécessaire de déterminer la richesse individuelle qui serait perdue (W_j) advenant un incident nucléaire et ce, pour chaque région. Pour ce faire, nous procéderons en trois étapes : premièrement, il faudra déterminer le nombre d'individus touchés par les divers états du monde. Deuxièmement, nous devons quantifier ces dommages pour chacune des trois zones. Finalement, nous agrégerons ces résultats pour déterminer objectivement la richesse individuelle qui serait perdue (W_j) suite à un possible incident nucléaire.

Évaluation du nombre de gens touchés par chaque état du monde

Pour en arriver à quantifier la richesse totale perdue dans chaque région, il faut en premier lieu déterminer le nombre de personnes touchées pour chaque état du monde. Il est à noter ici que nous ne considérerons que les états du monde causant des dommages sur la population et son environnement, étant donné que l'absence total d'incident n'implique aucun coût pour la société. Pour déterminer le nombre de personnes affectées pour chaque état du monde, il ne suffit que de multiplier la population en présence dans

la zone par les probabilités relatives à chaque état du monde et ce, pour nos deux scénarios (ST2 et ST21). Ces calculs vont nous fournir le nombre statistique de décès, de cancers et de gens qui malgré l'incident seront sans séquelle physique. Le tableau 5 résume ces données :

| Tableau 5 : Nombre de personnes touchées pour chaque état du monde | | | |
|---|------------------------|------------------------------|--------------|
| Groupe | États du monde | Nombre de personnes touchées | |
| | | ST2 | ST21 |
| | Décès statistiques | 255,04 | 172,11 |
| N ₁ = 850 000 personnes | Cancers statistiques | 573,23 | 337,34 |
| | Sans séquelle physique | 160 674,74 | 687 990,54 |
| | Décès statistiques | 2307,04 | 1556,22 |
| N ₂ = 7 685 000 personnes | Cancers statistiques | 5183,53 | 3050,18 |
| | Sans séquelle physique | 1 452 659,43 | 6 220 243,61 |
| | Décès statistiques | 188,38 | 177,18 |
| N ₃ = 3 857 700 personnes | Cancers statistiques | 377,48 | 343,72 |
| | Sans séquelle physique | 732 397,15 | 3 124 216,80 |

Valorisation des dommages causés par l'incident

Ayant établi le nombre de gens touchés par un éventuel incident, nous devons à présent y associer un équivalent monétaire pour la richesse individuelle perdue. Nous allons donc mettre un prix sur la valeur de la vie statistique perdue lors d'un décès ou d'un cancer ainsi que pour les personnes qui ne subiront aucune séquelle physique, mais qui devront vivre dans un monde chamboulé par l'incident nucléaire. Pour en arriver à quantifier cela, il nous faut a priori déterminer la valeur d'une vie humaine statistique. Nous utiliserons à ce chapitre les résultats d'une étude récente basée sur la sécurité routière au Canada. La valeur de la vie statistique que nous utiliserons a été fixée à 5,479M\$³⁹ (dollars canadiens constants de 2005). Elle provient de l'étude de Dionne (2000) et nous l'avons ajustée aux niveaux des prix pour l'Ontario, selon les données

³⁹ DIONNE, Georges et LANOIE, Paul, *How to make a public choice about the value of statistical life: The case of road safety*, HEC, Cahier de recherche no.IEA-02-04, 2002, page 5.

fournies par *Statistique Canada*⁴⁰. Pour obtenir la valeur de ces événements, il faut multiplier la valeur d'une vie humaine par la proportion de richesse perdue pour chaque état du monde. Ces valeurs sont calculées et détaillées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Valeurs de la vie et de la santé perdues pour chaque état du monde

| Groupe | État du monde | Perte de richesse (\$) | |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------|
| | | ST2 | ST21 |
| | Décès statistiques | 5 352 983 | 5 352 983 |
| (0-24 km) | Cancers statistiques | 534 203 | 534 203 |
| N ₁ | Sans séquelle physique | 21 368 | 21 368 |
| | Décès statistiques | 5 352 983 | 5 335 998 |
| (24-100 km) | Cancers statistiques | 533 655 | 513 930 |
| N ₂ | Sans séquelle physique | 21 368 | 1096 |
| | Décès statistiques | 5 335 998 | 5 335 450 |
| (100-1000 km) | Cancers statistiques | 513 930 | 513 382 |
| N ₃ | Sans séquelle physique | 1096 | 219 |

Un autre dommage que nous devons quantifier est la perte, suite à l'évacuation, des infrastructures pour la première zone. Comme il était pratiquement impossible de déterminer la valeur totale des infrastructures présentes dans le rayon de 0 à 24 kilomètres (N₁), nous devons trouver une méthode pour l'approximer. Pour faire cette approximation, nous avons choisi de déterminer la valeur des infrastructures dans la ville de Pickering pour ensuite le généraliser à l'ensemble de la zone. Nous avons choisi cette ville d'abord parce que la centrale y est située, ensuite parce qu'elle est représentative des municipalités environnantes par son tissu industriel et résidentiel. En 2005, la valeur taxable de la ville, terrains résidentiels, commerciaux et industriels, confondus, vacants et développés est de 7 810 544 568\$⁴¹. Pour généraliser le tout à la zone 1, il faut multiplier cette valeur par le poids démographique de la ville de Pickering sur la zone 1. Après calcul, la valeur totale des infrastructures perdues, suite à l'évacuation de la zone 1, est de 70 402 575 639\$ (dollars constants 2005).

⁴⁰ Selon le tableau 329-001 obtenu dans CANSIM, L'IPC pour l'Ontario décembre 2000 = 116.0, février 2005 = 127,1 l'année de base 1990 = 100.

⁴¹ City of Pickering, *Municipal Property Assessment*, Catherine Hodge, 2005.

Agrégation des résultats

Nous avons maintenant toutes les valeurs nécessaires pour déterminer la perte de richesse individuelle occasionnée par un incident nucléaire potentiel. Il faut donc calculer la somme des dommages pour chaque zone et le ramener sur une base per capita. Nous débuterons par la première zone. A priori, il faut déterminer la valeur des dommages sur la santé humaine. Pour cela, il suffit simplement de multiplier le nombre de personnes touchées par l'équivalent monétaire des états du monde concernés et de sommer le tout. Pour la première zone, après calcul, la valeur totale des dommages occasionnés par un éventuel incident nucléaire sur la santé humaine est de 19 082 286 238\$. Comme la région sera évacuée et que tous les bâtiments seront abandonnés, ajoutons la valeur des infrastructures, soit 70 402 575 639\$. La somme des deux donne un total de 89 484 861 877\$. Par conséquent, chaque personne habitant la zone 1 perdrait en moyenne, suite à un incident nucléaire, 104 500,59\$ (dollars constants 2005). Il ne reste plus qu'à faire la même chose pour les deux autres zones. Il ne faut toutefois pas oublier que ces deux zones ne sont pas évacuées, donc nous ne comptons pas la valeur des infrastructures qui s'y trouvent. Nous obtenons une perte de richesse totale de 62 845 142 110\$ pour la zone 2, soit 8177,64\$ par personne. Finalement, les pertes induites pour la zone 3 sont de l'ordre de 3 807 899 017\$, donc 987,10\$ par personne. Le tableau 7 résume les pertes individuelles pour chaque zone.

| Tableau 7 : Richesse personnelle moyenne perdue suite à un incident nucléaire | |
|--|--|
| Zone | Richesse perdue en \$/personne (W_i) |
| W_1 | 104 500,59 |
| W_2 | 8177,64 |
| W_3 | 987,10 |

Il peut sembler absurde que l'on généralise une perte monétaire pour l'ensemble des citoyens et que même ceux qui ne sont pas touchés se voient attribuer une perte de richesse potentielle. Nous devons toujours garder en tête que l'on travaille ici avec des morts statistiques et que, *ex-ante*, tous les habitants sont susceptibles d'être impactés. Nous sommes prêts maintenant à accorder une valeur individuelle au principe de précaution, c'est-à-dire le montant que chaque citoyen ontarien est prêt à déboursier par précaution pour se soustraire aux risques nucléaires engendrés par la réfection de l'unité

2 de Pickering A. Pour cela, il suffit de multiplier la richesse potentiellement perdue (W_j) par la proportion de richesse que les gens sont prêts à céder pour avoir accès à la précaution (M_{Aj}). Nous obtenons donc:

| Tableau 8 : Montant que les gens sont prêts à payer par le principe de précaution | |
|--|-----------------|
| Zone | \$ par personne |
| N ₁ | 49,40 |
| N ₂ | 3,73 |
| N ₃ | 0,17 |

Ainsi, tous les habitants de la région 1 seraient prêts à payer 49,40\$ annuellement, par le principe de précaution, pour éviter la réfection de la centrale ; les gens de la zone 2, 3,73\$ et ceux de la zone 3, 0,17\$. Jusqu'à présent, les résultats semblent crédibles et il est tout à fait normal que les gens de la région la plus rapprochée soient enclins à dépenser plus que ceux des régions éloignées, étant donné les risques beaucoup plus élevés qu'ils encourent en restant à proximité de la centrale.

V Monétisation du principe de précaution

Nous sommes à présent en mesure d'attribuer un montant global à la précaution demandée par la population ontarienne pour les risques nucléaires induits par la réfection de l'unité 2 de la centrale de Pickering A. Dans cette section, nous déterminerons par conséquent le montant total que la société ontarienne révèle vouloir payer, par le principe de précaution, pour se soustraire aux risques nucléaires. Comme mentionné précédemment, nous devons multiplier le montant que chaque citoyen ontarien est prêt à payer par précaution par le nombre d'habitants à l'intérieur de la zone. Ensuite, nous sommes ces valeurs pour les trois zones. Le montant ainsi obtenu représente le niveau monétaire de précaution que désire la collectivité ontarienne pour se soustraire aux risques induits par la réfection de l'unité 2 de Pickering A.

$$\text{Valeur principe de précaution} = \sum_{j=1}^3 [(M_{Aj})(W_j)](N_j) \quad \text{où } j = 1,2,3.$$

Après calcul, la somme obtenue pour les trois zones concrétise un montant annuel de 71 312 724\$ (dollars constants 2005). En définitive, la population ontarienne dans son ensemble serait prête à donner 71,31 millions de dollar annuellement par précaution pour se soustraire aux risques induits par la réfection de l'unité 2 de la centrale de Pickering A. Comme notre projet a une durée de vie de treize ans et que toutes nos probabilités sont sur une base annuelle, il faut faire l'actualisation des flux :

$$\sum_{t=1}^{13} \left[\frac{71,31}{(1+0,066)^t} \right] = 609,76 \text{ millions \$}$$

Par conséquent, dans l'optique d'une analyse de coût économique justifiée par un désir d'équité de la population ontarienne, il serait légitime de lui additionner la valeur du principe de précaution actualisé sur treize ans, soit 609,76 millions de dollars (dollars constants 2005). Cette section conclue donc notre application du principe de précaution à l'énergie nucléaire.

10. Analyse coût-efficacité

La présente section a pour but d'identifier explicitement l'alternative la plus valable d'un point de vue économique. Le tout sera fait en deux étapes. Nous ferons premièrement une analyse des flux différentiels ne contenant pas la valeur du principe de précaution, et une deuxième incluant cette fois le principe de précaution. Cette dichotomie est toujours due au fait que la société poursuit plusieurs buts, dans notre cas l'efficacité mais aussi l'équité. Nous utiliserons la méthode des flux différentiels pour déterminer le projet le plus rentable pour la société. Par conséquent, la décision sera basée sur le différentiel des coûts et externalités des deux points de vues. Agrégeons les données obtenues précédemment à l'aide de notre valeur actualisée incrémentale:

$$VA_{\text{gaz-nucléaire}} = \left[-\sum_{t=0}^2 \frac{I g_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{C g_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{CC g_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{EEG_t}{(1+r)^t} \right] - \left[-\sum_{t=0}^2 \frac{I n_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{C n_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{CGD_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{CC n_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{13} \frac{PP_t}{(1+r)^t} \right]$$

i. Analyse coût-efficacité sans précaution

$$VA_{\text{gaz-nucléaire}} = [-484,53 - 896,09 - 390,60 - 206,36] - [-969,04 - 560,42 - 162,91 - 68,41]$$

$$VA_{\text{gaz-nucléaire}} = -1886,30 + 1760,78 = -216,8$$

À présent, sommons toutes les valeurs obtenues, sauf le principe de précaution, étant donné que nous ne jugeons ici le projet que d'un point de vue efficacité. Par conséquent, l'analyse des flux différentiels démontre que le projet de réfection de la centrale nucléaire possède un avantage social de 216,8 millions\$ (en dollars constants 2005) au projet de construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel. La réfection de la centrale nucléaire est donc une solution supérieure économiquement, au sens de l'efficacité stricte.

ii. Analyse coût-efficacité avec précaution

$$VA_{\text{gaz-nucléaire}} = [-484,53 - 896,09 - 390,60 - 206,36] - [-969,04 - 560,42 - 162,91 - 68,41 - 609,76]$$
$$VA_{\text{gaz-nucléaire}} = -1886,30 + 2271,16 = 392,36$$

Nous prenons ici en considération le désir d'équité de la population que nous avons quantifié par le principe de précaution développé dans la section huit. Si nous faisons la somme des flux différentiels avec le principe de précaution, nous démontrons que le projet de réfection de la centrale nucléaire concède un avantage social de 392,36 millions\$ (en dollars constants 2005) au projet de construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel. La construction de la centrale à cycle combiné est donc une solution supérieure économiquement, du point de vue de l'équité.

11. Analyse des résultats

Pour débiter, il est essentiel de réaliser ici que les résultats obtenus sont tributaires des données fournies par les différentes analyses techniques utilisées dans notre étude. Nous considérons par conséquent que ces données sont fiables et légitimes, ce qui devrait diminuer le risque d'erreur encouru dans nos calculs, sans toutefois les éliminer complètement. Dans cette section, nous ferons ressortir les facteurs qui influencent et qui justifient nos résultats, tout en gardant un œil critique relativement aux deux pôles d'analyse en présence : l'efficacité et l'équité.

En utilisant un taux social d'actualisation de 6,6%, la valeur actualisée incrémentale concrétise comme meilleure alternative la réfection de la centrale nucléaire d'un point de vue d'efficacité stricte, et le projet de centrale à cycle combiné d'un point de vue équité. Effectivement, les flux différentiels démontrent que le projet de centrale au gaz est préférable à celui de la réfection de l'unité 2 de Pickering A et ce, pour l'équivalent de 216,8 millions\$ (dollars constants 2005), selon le désir d'efficacité de la population. À l'inverse, si l'on se place du côté de l'équité, l'analyse détermine la centrale au gaz comme meilleure alternative, à concurrence de 392,36 millions\$ (dollars constants 2005).

En premier lieu, ce qui frappe est la différence quasi symétrique des différentiels de coûts entre les deux visions de la société. Cette dichotomie illustre bien la dualité efficacité/équité que nous croyons présente dans la société ontarienne. D'un premier abord, la réfection de la centrale nucléaire est moins coûteuse et plus efficace au sens économiquement stricte. Toutefois, lorsqu'on y intègre le niveau de précaution désiré par la population, par le biais du principe de précaution, le gaz est économiquement supérieur au nucléaire. À ce niveau, les résultats confirment bien les idées préconçues que l'on peut se faire sur la population et son aversion pour l'énergie atomique. À ce chapitre, nous ne ferons aucune recommandation finale sur l'une ou l'autre des alternatives, l'un des deux résultats n'étant pas supérieur à l'autre, la différence ne tenant qu'à la perspective sociale d'équité et d'efficacité.

Si l'on compare les résultats des deux approches, trois principaux éléments en ressortent. Premièrement, la centrale nucléaire est beaucoup plus intensive en capital que la centrale au gaz, qui, pour sa part, est plus intensive en coûts d'opérations variables. En effet, 25,68% des coûts de la centrale au gaz seront attribués aux dépenses en capitaux fixes contre 55,03% pour la réfection de l'unité 2 de Pickering. Toutefois, 68,21% du coût du projet de centrale au gaz est assumé en frais annuels d'opérations et de carburant contre 41% pour la centrale nucléaire. Par conséquent, la proportion de frais variables est beaucoup plus importante pour le gaz que le nucléaire. Ainsi, il y a plus d'incertitudes sur les coûts de la centrale au gaz que sur la réfection de la centrale nucléaire. Cet aspect doit être considéré lors de la prise de décision, malgré le fait que nous ayons déjà indexé le prix du gaz à une augmentation annuelle réelle de 1,8%.

Deuxièmement, la prépondérance incontestable des externalités sur le choix des projets pour l'aspect équité et l'aspect efficacité. Effectivement, si l'on se replace dans le contexte d'efficacité stricte, la réfection est préférable à concurrence de 216,8 millions de dollars. Toutefois, la valeur de l'externalité induite par les gaz à effet de serre produits par la centrale au gaz est de 206,36 millions de dollars. Conséquemment, si l'on soustrait la valeur de cette externalité au projet de centrale à cycle combiné, le projet de réfection n'est à présent préférable que de 10 millions de dollars, ce qui est relativement peu : sur une valeur totale de près de 1,7 milliard de dollars, cela représente environ un demi pour cent. À l'inverse, si l'on se replace dans le contexte de l'équité, la centrale au gaz est préférable à hauteur de 392,36 millions de dollars. Néanmoins, la valeur du principe de précaution engendré par les risques émanant du nucléaire se chiffrent à 609,76 millions de dollars. Par conséquent, si l'on soustrait cette valeur au différentiel des flux, la centrale nucléaire s'approprie un avantage considérable de 217,31 millions de dollars. On peut donc réaliser, sans l'ombre d'un doute, l'impact prépondérant des externalités sur nos deux pôles d'analyse.

Troisièmement, la valeur de la vie statistique joue un rôle considérable dans notre étude basée sur l'équité. À vrai dire, la majeure partie de la différence qui existe entre l'équité et l'efficacité est tributaire de cette valeur. Pour notre projet, nous avons pris la

valeur de 5,479M\$ (dollars canadiens constants de 2005) proposée par Dionne (2000)⁴². Pourtant, d'autres grands spécialistes comme Viscusi⁴³ ou même la *Banque Mondiale* attribuent une valeur quasiment nulle à la vie. Par conséquent, si nous avons utilisé un montant se rapprochant de zéro pour la vie humaine, une bonne partie de la valeur du projet, concrétisée par l'équité et le principe de précaution, s'effacerait et le recours à cette méthode serait moins pertinente. Nonobstant cela, nous considérons que l'attribution d'une valeur suffisamment large à la vie fait partie de cet aspect d'équité que nous avons voulu capter par le principe de précaution.

À la lumière de ces comparaisons, il est important de voir ce qui se cache derrière les résultats obtenus pour nos deux pôles d'analyse. Tel que cité précédemment, l'analyse du point de vue efficacité n'est pas supérieure à celle du point de vue équité, c'est simplement le désir de la population qui change. Lors de la prise de décision, il sera essentiel de bien considérer les facteurs énoncés ci-haut pour avoir une vision d'ensemble du projet et de ses retombées.

⁴² DIONNE, Georges et LANOIE, Paul, *How to make a public choice about the value of statistical life: The case of road safety*, HEC, Cahier de recherche no.IEA-02-04, 2002, page 5.

⁴³ Viscusi, K., *The value of statistical life: A Critical Review of Market Estimates Throughout the World*, *Journal of Risk and Uncertainty*, 2003 p. 40.

12. Conclusion

Notre but principal était d'établir objectivement un ordre de décision pour pallier au manque à gagner énergétique ontarien. Sur la base des deux alternatives techniques proposées, nous sommes en mesure de donner nos choix pour deux objectifs sociaux différents, soit l'efficacité économique au sens strict, ainsi que l'équité. Un apport majeur de cette étude a été de considérer le désir d'équité, pour ainsi quantifier les perceptions du public ontarien sur les risques engendrés par l'énergie nucléaire. Grâce au principe de précaution, nous avons pu déterminer la valeur de la protection désirée par les citoyens de l'Ontario pour se soustraire au risque nucléaire.

À la lumière de nos résultats, il nous est malheureusement impossible d'évoquer un seul et unique choix sans faire de jugements de valeur. Nous allons donc émettre deux recommandations. Si notre objectif social est d'en arriver à un projet économiquement rentable d'un point de vue efficacité, nos résultats suggèrent la réfection immédiate de l'unité 2 de la centrale thermonucléaire de Pickering A. Néanmoins, si l'objectif poursuivi par la société est l'équité envers ses citoyens et leurs perceptions des risques associés à l'énergie nucléaire, nous recommandons la construction d'une centrale à cycle combiné alimentée au gaz naturel. Tel que discuté dans la section dix, beaucoup de facteurs sont toutefois à considérer pour en arriver à un choix éclairé. L'importance des externalités, de la variabilité des coûts ainsi que la valeur accordée au principe de précaution sont autant d'éléments à considérer.

Le présent document se veut une référence pour la décision finale de ce projet. Une place importante a été donnée au principe de précaution et aux perceptions qu'ont les citoyens ontariens des risques nucléaires. L'application du principe de précaution étant une formalisation économique très récente, des progrès techniques auront sûrement lieu dans un futur rapproché. Néanmoins, les résultats que nous avons obtenus semblent intuitivement justes et nous permettent un regard éclairé sur une situation où l'irréversibilité des dommages et la structure incomplète des informations ne permettait

pas d'obtenir une règle de décision optimale. Le principe de précaution nous a donc permis de dépasser ces limites pour offrir un regard quantitatif plus juste de la situation.

Les possibilités d'application du principe de précaution sont très larges et peuvent se généraliser à de nombreux domaines de l'activité humaine. Par exemple, les contestations massives à l'égard de la centrale à cycle combiné du Suroît, au Québec, laissent croire que les gens avaient un désir réel de protection contre cette méthode de production d'électricité aux retombées incertaines sur l'environnement et sur la santé des citoyens. Nous allons même jusqu'à prétendre qu'il aurait été souhaitable pour le gouvernement du Québec de faire appel au principe de précaution. Ainsi, en intégrant le niveau de précaution choisit par la société québécoise à l'évaluation économique de la centrale à cycle combiné du Suroît, il y a fort à parier que les conclusions eurent été largement différentes. Ce point de vue aurait nécessairement pu éclairer le gouvernement dans ses discussions avec la population du Québec. Comme nous venons de le voir, l'application quantitative du principe de précaution n'en est qu'à ses balbutiements, mais ses domaines d'applications sont infiniment vastes. De plus ce principe permet de considérer tout un pan de l'analyse du risque que nous ne pouvions quantifier auparavant. Pour toutes ces raisons et pour le bien-être des communautés futures, il est à souhaiter que son utilisation se généralise à plusieurs domaines où l'incertitude et l'activité humaine impose des choix irréversibles sur la collectivité.

13. Bibliographie

ALLEN, P.J., *Summary of CANDU 6 Probabilistic Safety Assessment Study Results*, Nuclear Safety, Vol 31, No.2, April-June 1990.

ASCARI, S. et BERNASCONI, M., *The Economics of Risk and Uncertainty and the Valuation of Severe Accidents*, ExternE – Task 1.5 Accidents, Improvement of the Assessment of Severe Accidents, Rapport final, Mai 1998.

ÉNERGIE NB, *Point Lepreau Evaluation : Integrated Resource Plan*, 2002, <http://nuclear.nbpower.com/en/regulatory/appendixb-1.pdf>.

BARGIACCHI, Rosella, *Climate change scenarios and the precautionary principle*, À paraître: Risk and Uncertainty in Environmental and Resources Economics, J. Wesseler, H.P.

CERI, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, Canadian Energy Research Institute, Août 2004.

COMMISSION EUROPÉENNE, ExternE, *Externality of Energy, Volume 2: Methodology*, 1995, <http://www.externe.info/reportex/vol2.pdf>.

COMMISSION EUROPÉENNE, ExternE, *Externality of Energy, Volume 5: Nuclear*, 1995.

COMMISSION EUROPÉENNE, ExternE, *Externality of Energy, Volume 7: Methodology 1998 update*, 1999, <http://www.externe.info/reportex/vol7.pdf>.

DIONNE, Georges et LANOIE, Paul, *How to make a public choice about the value of statistical life: The case of road safety*, HEC, Cahier de recherche no.IEA-02-04, 2002.

GARELLO, Pierre, *Théorie de la décision : Bilan et perspective*, Centre d'analyse économique, Lecture annuelle SESAME, Montpellier, Septembre 1998.

GOUVERNEMENT DU CANADA, *Une perspective canadienne sur l'approche/principe de précaution : Document de consultation, 2001*,
http://www.ec.gc.ca/econom/discussion_f.htm.

ECKHOUDT, L., *Risk aversion and the external cost of a nuclear accident*, Journal of Environmental Management (2000) 58 109-117.

ECKHOUDT, L. et SCHIEBER, T., *Integration of Risk Aversion in the Calculation of the External Costs of a Nuclear Accident : Expected Utility Approach*, ExternE – Task 1.5 Accidents, Improvement of the Assessment of Severe Accidents, Rapport final, Mai 1998.

HEYES, A., *Liability Capping and Financial Subsidy in North American Nuclear Power*, University of London, <http://www.akf.dk/som/pdf/som32/5heyes.pdf>.

KLEIN, Manfred, *Pollution Prevention and Energy Conservation – Valuation of Multiple Benefits*, Septembre 2003.

MARKANDYA, A., University of Bath, et SCHNEIDER, T., CEPN, ExternE – Task 1.5 Accidents, Improvement of the Assessment of Severe Accidents, Rapport final, Mai 1998.

MARTIN, Fernand, *Évaluation de projets publics*, Guide pour la lecture des ouvrages principaux, ECN-6873, Département de sciences économiques, Université de Montréal, 2003-2004.

MARTIN, Fernand, *Notes de cours ECN 6883*, Atelier en évaluation de projets, Département de sciences économiques, Université de Montréal, 2002-2003.

NATURAL RESSOURCES CANADA, *Comparative cost of Electricity Generation: A Canadian Perspective*, 2003, <http://www2.nrcan.gc.ca/es/erb/erb/english/>.

OPG REVIEW COMMITTEE, *Transforming Ontario's Power Generation Company*, Avril 2004.

MINISTERE DES FINANCES DE L'ONTARIO, *Ontario Population Projections 2004-203*, Février 2005, <http://www.gov.on.ca/FIN/english/demographics/demog05e.pdf>

VISCUSI, K., *The value of statistical life: A Critical Review of Market Estimates Throughout the World*, *Journal of Risk and Uncertainty*, 2003 27:1 5-76.