

**Recherche appuyée par
le Programme de recherche et développement de
l'Agence canadienne d'évaluation environnementale**

Le processus décisionnel en univers incertain visant l'adaptation au changement climatique des évaluations environnementales de projets

Préparé par :

**Philip H. Byer, enquêteur principal
Professeur de génie civil
Université de Toronto**

**Andrew F. Colombo
Agrégé de recherche
Département du génie civil
Université de Toronto**

**Andrea Sabelli et Cristian Ches
Étudiants diplômés
Département de géographie
Université de Toronto**

No. au catalogue En106-98/2011F-PDF
ISBN 978-1-100-97271-8

Ce rapport a été préparé avec l'appui du Programme de recherche et développement de l'Agence canadienne d'évaluation environnementale. Les points de vue, les conclusions et les recommandations exprimées aux présentes appartiennent aux auteurs de ce rapport et ne représentent pas les points de vue de l'Agence canadienne d'évaluation environnementale ni ceux du gouvernement du Canada.

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les concepts et les méthodologies d'aide à la décision à l'intention des promoteurs de projets ; il traite de l'adaptation au changement climatique compte tenu des incertitudes sur le degré du changement climatique durant la planification du projet. Les résultats d'une enquête sur 15 évaluations environnementales (EE) récentes de différents types de projets indiquent que, bien que la majorité d'entre elles fassent référence aux effets potentiels du changement climatique sur leurs projets respectifs, la plupart ne traitent pas de ce sujet de façon systématique. Ce rapport examine la documentation récente portant sur la façon d'aborder le problème de l'incertitude durant le processus de décision tel que dans les modèles décisionnels classiques (maximin, regret minimax, etc.) et l'analyse bayésienne. Il explique et illustre ensuite l'utilité de ces méthodes ainsi que celle de la gestion adaptative des problèmes à attributs uniques ou multiples. On y suggère aussi des lignes directrices visant à incorporer cette recherche dans la pratique des EE.

TABLE DES MATIÈRES

ABRÉVIATIONS.....	VII
1. INTRODUCTION.....	1
2. MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE ET STRUCTURE DU RAPPORT	3
3. L'INCERTITUDE	4
4. L'ADAPTATION.....	5
4.1 La non-intervention.....	8
4.2 Le renforcement des concepts existants	9
4.3 La gestion de la variabilité	9
4.4 La re-conceptualisation du projet	9
4.5 La gestion adaptative.....	9
5. L'EXAMEN DES EE DE PROJETS CANADIENNES	12
5.1 Les projets hydroélectriques	13
5.2 Les projets de pipelines	17
5.3 Les projets miniers, de forage et de restauration.....	19
5.4 Le projet nucléaire	21
5.5 Les projets de parcs éoliens.....	22
5.6 Le mot de la fin.....	23
6. LE PROCESSUS DE DÉCISION DANS LE CONTEXTE INCERTAIN DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE ANALYSE DOCUMENTAIRE DES MÉTHODES	24
6.1 Les méthodes utilisant les probabilités.....	25
6.2 Les méthodes sans probabilités	26
6.3 La gestion adaptative et le concept de souplesse	27
6.4 Les conclusions de l'analyse documentaire.....	28

7. LES MODÈLES DE DÉCISION AU NIVEAU DU PROJET POUR LES EE	28
7.1 L'application des règles de décision en univers incertain	28
7.2 Les méthodes avec probabilités.....	34
7.3 La gestion adaptative et le rôle de la souplesse.....	36
7.4 L'analyse avec les probabilités et la gestion adaptative	43
7.5 La transition climatique	45
7.6 Une complexité accrue: la structure de problèmes à deux attributs.....	48
7.7 Une orientation différente pour les concepts	53
7.8 Mot de la fin sur les méthodes de décision.....	54
8. CONCLUSIONS ET LIGNES DIRECTRICES.....	55
9. ANNEXES.....	58
9.1 Annexe 1 : Horaire du groupe de travail et de ses participants.....	58
9.2 Annexe 2 : Calculs généralisés du net gain financier	61
9.3 Annexe 3 : Le regret du choix du concept et les frais souples.....	63
10. RÉFÉRENCES.....	65

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Méthodes générales d'adaptation au changement climatique durant la conception et l'exploitation d'un projet	8
Figure 7.1	L'arbre de décision pour l'exemple de la valeur espérée	36
Figure 7.2	Les mouvements de trésorerie et les valeurs actuelles d'une construction en phases	37
Figure 7.3	L'arbre de décision pour les trois concepts et la souplesse	44
Figure 7.4	La transition climatique progressive et l'expansion de capacité en phases	46
Figure 7.5	La transition en une seule étape du scénario 1 au scénario 2 ou 3	46
Figure 7.6	La transition en deux étapes du scénario 1 au scénario 3 en passant par le scénario 2 (scénario 2 à 3)	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Effets néfastes sur une sélection de concepts et de scénarios	3
Tableau 7.1	Les coûts du projet et le net gain financier global incluant les coûts initiaux	30
Tableau 7.2	Le critère pessimiste maximin	31
Tableau 7.3	Le critère optimiste maximax	32
Tableau 7.4	le critère du regret minimax	32
Tableau 7.5	Le critère de Hurwicz en fonction d'alpha	33
Tableau 7.6	Les effets de perturbation de la faune	34
Tableau 7.7	Coûts et avantages selon une stratégie adaptative	38
Tableau 7.8	Net gain financier des options de concept avec souplesse	39
Tableau 7.9	Les matrices des nets gains financiers et des regrets pour les deux concepts et une souplesse de $X = 5$	40
Tableau 7.10	Matrices des nets gains financiers et des regrets pour les deux concepts et une souplesse de $X = 10$	41
Tableau 7.11	Les coûts et avantages des trois concepts et de la souplesse	42
Tableau 7.12	Net gain financier pour trois concepts et les frais souples de X	42
Tableau 7.13	Les matrices des nets gains financiers et des regrets pour trois concepts et des frais souples peu élevés ($X = 5$)	43
Tableau 7.14	Les matrices des nets gains financiers et des regrets qui incluent la transition en deux étapes (scénario 2 à 3)	48
Tableau 7.15	Les matrices des nets gains financiers et des probabilités annuelles d'inondation	49
Tableau 7.16	Les matrices des regrets pour les deux attributs du net gain financier et de la probabilité d'inondation	50
Tableau 7.17	Un problème à deux attributs ayant des probabilités d'inondation exprimées qualitativement	51
Tableau 7.18	Les matrices des nets gains financiers et des probabilités d'inondation avec un changement après 10 ans.	52
Tableau 7.19	Les nets gains financiers et les probabilités d'inondation pour les concepts orientés vers la protection contre l'inondation incluant la souplesse	53
Tableau 7.20	Les matrices des nets gains financiers et des probabilités d'inondation pour toutes les options.	54
Tableau 9.1	Détermination généralisée de la valeur actualisée nette pour les trois concepts et la souplesse	61
Tableau 9.2	Calcul de la valeur actualisée nette pour le scénario de transition, scénario 2 à 3	62
Tableau 9.3	Matrice des regrets pour les deux concepts et la souplesse exprimée en frais souples X	63

Abréviations

GC	gouvernement du Canada
GES	gaz à effet de serre
EE	évaluation environnementale
CFPT	comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale
GIEC	groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
VAN	valeur actualisée nette

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants à l'Agence canadienne d'évaluation environnementale d'avoir appuyé financièrement cette recherche dans le cadre de son Programme de recherche et développement. Ils remercient aussi les participants au groupe de travail du 27 avril 2010 de leurs conseils sur ces travaux qui n'étaient alors qu'au stade de la mise au point. Il nous faut encore remercier deux réviseurs anonymes d'avoir procuré des commentaires utiles sur l'avant-projet du rapport, sans oublier Alan Yoshioka, l'éditeur du manuscrit rédigé en anglais.

Sommaire

Il existe, d'ores et déjà, un consensus que le changement climatique aura des répercussions sur l'activité humaine dans un certain nombre de sphères bien que les effets précis en soient encore très incertains. L'Agence canadienne d'évaluation environnementale a financé cette étude en vue de faire progresser l'élaboration et l'adaptation des méthodes d'évaluation environnementale (EE), visant à incorporer les incertitudes sur le changement climatique au niveau du projet.

La recherche examine une sélection de différents critères et méthodes du processus de décision en univers incertain comprenant des méthodes reconnues telles que minimiser le regret le plus élevé, maximiser le résultat le plus faible et la valeur espérée. Ces méthodes permettent d'intégrer, au processus de décision, les attitudes envers les risques et les incertitudes ainsi qu'envers les hypothèses sur la probabilité des scénarios futurs. La gestion adaptative, dont la souplesse permet l'ajustement au changement climatique, y est également considérée comme un moyen de traiter des incertitudes.

Le rapport comprend les quatre éléments suivants qui abordent ces questions ; les deux premiers éléments procurent le contexte du troisième qui est lui-même le but principal de ce rapport :

- i) un examen de la façon dont les récentes EE de projets canadiennes abordent le problème des incertitudes sur le changement climatique (Section 5) ;
- ii) un examen d'une sélection documentaire sur les méthodologies visant à intégrer les incertitudes dans le processus de décision (Section 6) ;
- iii) une explication et une discussion portant sur l'utilité de ces méthodes comme outil d'aide à la décision en matière d'adaptation au changement climatique (Section 7) ;
- iv) des suggestions sur la façon dont ces travaux pourraient éclairer l'élaboration de lignes directrices sur les EE de projets visant à tenir compte de l'incertitude sur le changement climatique (Section 8).

Ce rapport examine la façon dont les EE de projets canadiennes tiennent compte du changement climatique. On a, plus exactement, cherché à savoir non seulement comment les EE abordent le problème des répercussions potentielles du projet sur le climat, mais aussi quelles mesures d'adaptation ont été envisagées et comment ces dernières ont été déterminées. On a examiné quinze EE qui avaient été effectuées de 2000 à 2009 dans différents secteurs industriels, dont les secteurs hydroélectrique, minier, de forage, de restauration, des pipelines, du nucléaire et des projets de parcs éoliens pour lesquels on avait prévu que le changement climatique présenterait un problème. Seules deux de ces évaluations n'ont pas mentionné le changement climatique. Bien que la majorité des 15 EE de cette étude fassent référence aux répercussions potentielles du changement climatique sur le projet, elles concluent dans l'ensemble que ces conséquences n'auront que peu d'effet sur la conception du projet ou son exploitation. Deux explications ont couramment été offertes : les effets du changement climatique ne se produiront pas durant la durée de vie du projet et il

existe tout simplement trop d'incertitudes concernant les prédictions sur le changement climatique pour les intégrer convenablement dans la conception du projet. La complexité du changement climatique et les difficultés à « deviner » quel sera le futur climat font que les promoteurs de projets tendent à préférer un complément de recherche, de surveillance continue et d'adaptation comme étant les stratégies les plus pratiques. On a donc besoin de méthodes pour sélectionner des stratégies d'adaptation puisque la capacité des promoteurs de projets à aborder convenablement le changement climatique et ses incertitudes est encore très restreinte. On a aussi besoin de méthodes d'aide à l'identification de la stratégie préférée pour les scénarios incertains futurs.

On a examiné la documentation pertinente en matière de méthodes d'aide à la décision dans un contexte d'incertitude sur le changement climatique, avec et sans l'estimation de la probabilité des scénarios climatiques futurs. La plupart des méthodes normalisées d'évaluation des différentes options de projets, tel que l'analyse coût-avantage et l'analyse à attributs multiples souffrent d'une incapacité à aborder valablement les incertitudes qui sont inhérentes au changement climatique. Il existe, cependant, un certain nombre de méthodes classiques qui incorporent expressément les attitudes envers les risques et les incertitudes dans le processus décisionnel. La documentation sur ces méthodes est importante, mais celle qui s'applique au changement climatique est restreinte et, en règle générale, ne présente que des exemples et des explications très limités.

Ce rapport poursuit ensuite au sujet de l'application de ces méthodes à l'évaluation des mesures d'adaptation compte tenu des incertitudes sur le changement climatique. Les critères pris en considération incluent : maximin/minimax, maximax/minimin, le regret minimax, Hurwicz en fonction d'alpha et la valeur espérée. Ces méthodes offrent des outils utiles à la comparaison des options d'adaptation au changement climatique qui tiennent compte d'incertitudes marquées.

Ces méthodes peuvent aussi être utilisées pour comparer les stratégies adaptatives et non adaptatives. La gestion adaptative (telle que les « options réelles ») peut exiger un coût initial supplémentaire qui consiste à « acheter » la souplesse permettant aux actions futures de s'adapter au changement climatique au fur et à mesure que les données climatiques deviennent mieux connues ce qui, par essence, consiste à payer pour réduire l'incertitude.

Ces méthodes sont illustrées dans le cas hypothétique d'un projet hydroélectrique ayant des problèmes à attribut unique ou double ainsi que des mesures qualitatives et quantitatives. Les premiers exemples traitent d'un attribut unique pour mieux illustrer les critères différents. Ils deviennent ensuite plus complexes avec l'addition d'un nouvel attribut. Les exemples indiquent que ces méthodes peuvent procurer des renseignements valables pour la prise de décision en exigeant de tenir explicitement compte des options de scénarios futurs et en identifiant comment les attitudes envers les risques et les incertitudes influencent le choix de l'option. Les résultats sont

transparents et peuvent être relativement simples à interpréter, ce qui facilite les discussions au sujet des compromis en présence d'incertitudes.

L'implantation de ces méthodes exige de choisir un ensemble approprié de scénarios et d'options d'adaptation, d'évaluer les répercussions qu'auront les combinaisons d'options sur les scénarios climatiques futurs, de comprendre les attitudes du décideur et des autres parties intéressées envers les risques et les incertitudes, d'appliquer les règles correspondantes de décision et de communiquer efficacement les résultats des conflits et des compromis.

Les lignes directrices peuvent non seulement aider les promoteurs à aborder ces questions, mais aussi aider les réviseurs à juger si l'on a suffisamment traité de ces dernières. C'est en fonction de cette recherche que l'on suggère la liste suivante de lignes directrices d'ordre général sur le choix et l'utilité des méthodes d'aide à la décision en matière d'adaptation au changement climatique et aux incertitudes. Les promoteurs devraient expressément :

i) déterminer et définir si et dans quelle mesure le changement climatique futur peut affecter le projet directement et indirectement ;

et pour chacune des vulnérabilités du projet,

ii) déterminer la portée potentielle du changement climatique et sélectionner les scénarios de changement climatique qui caractérisent le mieux cette portée et la synchronisation des effets ;

iii) déterminer des options de conception y compris les stratégies de gestion adaptative permettant d'adapter le projet aux scénarios climatiques futurs ;

iv) estimer le niveau de l'effet de chaque option de concept pour chaque scénario ;

v) déterminer et justifier le choix approprié d'une ou des méthodes d'aide à la décision qui consistent à comparer les options de concepts en fonction des effets estimés et des attitudes des décideurs envers les risques et les incertitudes ;

vi) communiquer les résultats de l'analyse de façon à ce que les décideurs et les parties intéressées comprennent les implications liées aux incertitudes et aux compromis des différentes options de concepts.

Chacune de ces lignes directrices d'ordre général devrait être élaborée en des lignes directrices plus détaillées et inclure les commentaires des promoteurs visés, des réviseurs de l'agence, des experts-conseils et des organisations non gouvernementales qui s'intéressent au changement climatique. La discussion et les explications contenues dans ce rapport peuvent aussi procurer des conseils utiles à l'élaboration de lignes directrices plus approfondies.

1. Introduction

Il existe, d'ores et déjà, un consensus que le changement climatique (principalement le réchauffement climatique causé par les concentrations croissantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère) affectera l'activité humaine dans un certain nombre de sphères bien que les effets précis en soient encore très incertains. L'Agence canadienne d'évaluation environnementale a détecté que les praticiens des EE doivent traiter du changement climatique dès la planification des projets pouvant affecter ou être affectés par le changement climatique.

Les lignes directrices du *Comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale de 2003* (Canada CFPT, 2003) posent des jalons importants pour les EE en clarifiant l'importance de tenir compte du changement climatique au niveau du projet, en expliquant pourquoi il faut traiter du changement climatique et en offrant des conseils d'ordre général sur la manière de le faire.

Les lignes directrices proposent deux méthodes générales pratiques : 1) identifier les sources des émissions de GES liées au projet et estimer leur ampleur (facteurs GES) ; et 2) déterminer dans quelle mesure le changement climatique affecte un projet proposé (facteurs des répercussions). Cette étude se concentre sur cette dernière. Les promoteurs peuvent donner suite aux actions recommandées au niveau du projet avec « la détermination de la sensibilité du projet aux paramètres et à la variabilité climatiques » et « la communication aux décideurs d'intérêt public du contexte lié au changement climatique dans lequel s'inscrit le nouveau développement proposé ». (Canada CFTP, 2003, 2). Cette étude vise particulièrement à faciliter ces deux actions. De plus, les lignes directrices ajoutent que :

« Lorsque les risques associés aux effets du changement climatique d'un projet ne concernent que des intérêts privés (par exemple la rentabilité à long terme du projet), le promoteur peut choisir d'assumer ce risque. Toutefois, si ces risques dépassent le projet et portent atteinte au public ou à l'environnement, les autorités concernées doivent les intégrer à une prise de décision éclairée des autorités pertinentes. » (Canada CFTP, 2003, 13)

Alors que les lignes directrices du comité FPT offrent des conseils d'ordre général et sont un point de départ utile, elles ne procurent pas d'informations sur les techniques spéciales gérant l'incertitude durant le processus décisionnel du promoteur. L'incertitude inhérente au changement climatique constitue un défi important pour les EE. Les promoteurs de projets ont la tâche difficile de choisir les options à la conception du projet en présence d'incertitudes sur le changement climatique. L'étude minutieuse d'un projet particulier d'une EE doit être effectuée dans délai fixé et doit utiliser les ressources existantes (Paoli, 1994) pour être utile. Le fait de traiter des incertitudes au moyen d'une combinaison de méthodes et d'une variété d'outils

aboutit aujourd'hui à de meilleures décisions au sujet d'éléments qui ne seront observables que demain.

L'Agence a financé cette étude en vue de faire progresser et adapter les méthodes intégrant les incertitudes sur le changement climatique au niveau des EE de projets. Cette recherche prend appui sur un rapport antérieur destiné à l'Agence par Byer *et al.* (2004) qui examinait l'usage d'analyses probabilistes et de sensibilité pour scénarios comme moyens d'estimer les effets de l'incertitude liée au changement climatique sur le rendement d'un projet. Les analyses de scénarios et la simulation par ordinateur aident les analystes à créer des scénarios de représentation pour générer des ensembles de données synthétisées de variables pertinentes (températures, écoulements fluviaux, production d'énergie électrique, inondations, etc.) ; ceci pour être en mesure d'évaluer le rendement d'un projet ayant des conditions futures incertaines. Les analyses probabilistes estiment la probabilité de ces variables et les analyses de sensibilité aident à identifier les variables essentielles les plus affectées par le changement climatique.

Ces méthodes procurent des informations précieuses sur les répercussions potentielles d'une variété d'hypothèses sur le changement climatique. Byer *et al.* (2004; 2009) et Byer et Yeomans (2007), par exemple, indiquent qu'un projet hydroélectrique conçu en fonction de l'écoulement fluvial historique produirait moins d'électricité et causerait plus d'inondations que s'il était conçu en fonction de la variabilité croissante de l'écoulement fluvial produite par le changement climatique. Si l'on pouvait être certain de l'étendue de la hausse de la variabilité de l'écoulement fluvial, le concept du projet pourrait être modifié en fonction de ce facteur (par l'augmentation du volume du réservoir, l'ajout de turbines, la modification du chenal marginal, l'établissement d'une différente stratégie de lâcher des eaux, etc.). Il existe, beaucoup de scénarios climatiques possibles à l'avenir cependant on ne sait pas sur lequel baser la conception.

Pour illustrer ce défi, examinez un exemple abstrait (Tableau 1.1) dans lequel un décideur doit sélectionner le concept approprié à un projet en fonction d'un seul effet, ceci dans l'incertitude du changement climatique. On considère que trois scénarios climatiques représentent l'étendue de l'incertitude à laquelle pourrait se heurter la réalisation du projet. Ces scénarios sont les suivants : 1) le climat actuel persiste, 2) le climat subit un changement modéré et 3) le climat subit un changement plus important. C'est en fonction de ces scénarios qu'on présente au décideur trois concepts de projet (A, B et C) correspondant à un scénario climatique particulier (1, 2 et 3 respectivement). Le concept de projet est créé pour un scénario correspondant afin de réaliser l'effet néfaste le plus faible (les valeurs du tableau). Si, par exemple, le concept B est choisi et que le scénario 2 se produit (changement modéré), le niveau de l'effet résultant du projet sera de 32.

Tableau 1.1 Effets néfastes sur une sélection de concepts et de scénarios

Options de concept	Scénario climatique		
	Changement :		
	aucun 1	modéré 2	important 3
A	18	42	65
B	24	32	45
C	28	36	40

La meilleure option de concept dépend du scénario qui se matérialisera ultérieurement et si on savait quel scénario allait se produire, on saurait aussi quel concept de projet choisir. Si, par exemple, le scénario 1 se produisait, il faudrait choisir le concept A pour obtenir l'effet néfaste le plus faible (18); si le scénario 2 se produisait, il faudrait choisir le concept B puisqu'il a l'effet le plus faible (32) et s'il s'agissait du scénario 3, il faudrait choisir le concept C qui a un effet de 40. Si le promoteur fait abstraction du changement climatique et conçoit le projet « sans changement », le résultat est le concept A. Cependant, si le changement se produit, il y aura des coûts liés aux effets accrus anticipés qui dans ce cas représentent une augmentation allant de 18 à 42 ou 65.

La méthode adoptée dans certains champs d'application et par certains planificateurs de projets est de supposer qu'un scénario futur particulier se produira et de concevoir le projet en fonction de ce scénario ; concevoir, par exemple, un système de gestion des eaux de ruissellement en supposant une augmentation particulière de l'intensité des orages. Mais nous ne savons pas quel scénario se réalisera et on peut facilement choisir le concept qui ne sera plus le meilleur quand se produira le changement climatique. Ainsi, si le concept C est sélectionné, mais que le changement climatique se trouve être modéré (scénario 2), l'effet est pire (36 au lieu de 32). Même s'il y a des raisons de préférer un scénario (ex. : scénario 3), il existe encore la possibilité que l'un des autres scénarios se produise et tout ceci devait être pris en considération durant la prise de décision. Ce rapport examine comment prendre des décisions dans de telles circonstances.

2. Méthodologie de recherche et structure du rapport

Faisant suite aux travaux du rapport antérieur, cette recherche examine des critères et méthodes additionnels d'aide à la décision en univers incertain ; elle inclut des méthodes reconnues telles que la minimisation du regret maximum, la maximisation du résultat le plus faible, l'espérance d'utilité (Grima *et al.*, 1986; Kassouf, 1970; Keeney et Raiffa, 1976; Lifson, 1972; Welch, 2002) et des méthodes plus récentes

telles que l'analyse par les « options réelles » (de Neufville, 2004). Ces méthodes intègrent, du moins implicitement, les attitudes envers les risques, les incertitudes et les suppositions, au sujet de la vraisemblance des scénarios futurs. L'utilisation d'options réelles, dont le concept intègre la capacité à s'ajuster aux circonstances changeantes, est une forme de gestion adaptative et une méthode prometteuse de traitement des incertitudes sur le changement climatique.

L'applicabilité de ces méthodes à des projets spécifiques dépend d'un certain nombre de facteurs dont savoir :

- si les effets peuvent être quantitativement ou qualitativement estimés ;
- s'il n'existe qu'un seul objectif (ex. : le coût économique) ou des objectifs multiples (ex. : coûts et vies) dont il faut traiter et,
- si la capacité d'adaptation peut être intégrée dans le projet ce qui facilite la prise des mesures d'adaptation futures (ex. : concevoir un mur d'endiguement de façon à permettre des rehaussements ultérieurs).

Le rapport comprend les quatre éléments suivants qui abordent ces questions ; les deux premiers éléments procurent le contexte du troisième qui lui-même est le but principal de ce rapport :

- i) un examen de la façon dont les récentes EE de projets canadiennes abordent le problème des incertitudes sur le changement climatique (Section 5) ;
- ii) un examen d'une sélection documentaire sur les méthodologies visant à intégrer les incertitudes dans le processus de décision (Section 6) ;
- iii) une explication et une discussion portant sur l'utilité de ces méthodes comme outil d'aide à la décision en matière d'adaptation au changement climatique (Section 7) ;
- iv) des suggestions sur la façon dont ces travaux pourraient éclairer l'élaboration de lignes directrices sur les EE de projets visant à tenir compte de l'incertitude sur le changement climatique (Section 8).

C'est en passant par ces étapes que les travaux visent à présenter, de façon relativement explicite¹, des modèles éprouvés d'outils d'aide à la décision à une communauté d'EE plus importante.

3. L'incertitude

¹ Pour obtenir des conseils sur ces travaux, un groupe de travail d'une journée s'est tenu le 27 avril 2010 à l'université de Toronto où les résultats préliminaires ont été présentés à environ 20 personnes qui participaient à des EE de projets ou de changement climatique. Vous trouverez l'horaire et la liste des participants à ce groupe de travail à l'annexe 1 (Section 9.1). Les participants ont confirmé la validité des concepts et des méthodes présentés.

Les promoteurs de projets sont confrontés à des incertitudes² sur le changement climatique qui proviennent de deux sources interdépendantes : les incertitudes sur l'état futur du climat et les incertitudes causées par les répercussions du projet sur le climat local. Négocier ces incertitudes demeure un défi important ; cependant, les planificateurs de projets effectuent souvent des suppositions sur la robustesse d'un projet ou sur des horizons de planification assez courts pour que le climat reste stable durant la durée de vie du projet au lieu d'aborder expressément le problème de l'incertitude sur le changement climatique dans leurs cadres décisionnels. Les EE examinées dans la Section 5 reflètent cette tendance.

La mise au point de futurs scénarios utiles, en fonction desquels les planificateurs prendront les décisions essentielles, peut être complexe. Les scénarios de changement climatique sont normalement des réalisations simulées par ordinateur de changements climatiques possibles ; ils tiennent compte de différents paramètres statistiques de variables climatiques (telles que la moyenne de la température maximum quotidienne ou les précipitations mensuelles, etc.) Le contenu du scénario dépend d'un grand nombre de variables et d'hypothèses qui incluent la portée et le perfectionnement du modèle (par exemple, les processus du modèle de circulation atmosphérique et leurs représentations mathématiques), les phénomènes de sous-échelle et la grille de résolution numérique.

Par le passé, les planificateurs fondaient leurs conceptions sur les conditions climatiques historiques et supposaient que la variabilité climatique (ex. : la fréquence et l'intensité des orages) était stationnaire ce qui signifiait que les lois de probabilité des températures, des précipitations, etc. ne changeaient pas. Il se trouve que le changement climatique changera l'amplitude et le décalage de la variabilité climatique ce qui signifie que les paramètres statistiques observés historiquement risquent de ne plus être valables pour y baser la conception du projet.

Byer *et al.* (2004) ont illustré l'importance de l'analyse de scénarios comme outil intégrant l'incertitude sur le changement climatique dans les EE de projets. Cette méthode est axée sur l'étude minutieuse de sous-ensembles discrets de scénarios qui délimitent la portée vraisemblable du changement climatique possible auquel le projet sera confronté ; ce qui rend plus facile à résoudre les éléments de calcul. Les scénarios de représentation facilitent les modèles d'aide à la décision présentés plus tard dans ce rapport. La question principale consiste à déterminer quels sont les scénarios valables qui définiront un éventail approprié d'effets vraisemblables.

4. L'adaptation

² Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définit l'incertitude comme « une expression du degré avec lequel une valeur est inconnue » qui « peut être dû à un manque d'informations ou à un désaccord sur ce qui est connu, voire sur ce qui peut être connu » et qui « peut avoir des origines diverses depuis des erreurs quantifiables au niveau des données jusqu'à des concepts ou une terminologie aux définitions ambiguës » (GIEC, 2007, 882).

Les deux stratégies généralisées traitant du changement climatique sont l'atténuation et l'adaptation. L'atténuation tente de réduire directement les émissions de gaz à effet de serre et de ralentir l'ampleur du changement climatique à l'aide d'une variété de méthodes telles que la substitution de l'énergie renouvelable au combustible fossile ou le repeuplement des forêts pour relancer l'assimilation du gaz carbonique. Elle vise à réduire la sévérité du changement climatique en espérant empêcher un certain degré de réchauffement évitable et ralentir la progression du réchauffement inévitable. Il apparaît que l'atténuation, à elle seule, est pour le moins insuffisante à éviter certaines perturbations climatiques. Il reste donc l'adaptation, une forme de gestion du risque et une méthode indispensable qui réduit la vulnérabilité des projets liée au changement climatique (Stern, 2007; GIEC, 2007).

L'adaptation au changement climatique consiste de « l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques » (GIEC, 2007, 869)³. Elle est fondée sur le principe qu'un certain degré de changement climatique est d'ores et déjà en cours ou imminent, que les différents effets qui y sont associés sont inévitables et que plusieurs d'entre eux ont déjà été répertoriés (Canada GC, 2007). À ce titre, on a de plus en plus couramment intégré le changement climatique dans les politiques et les projets dans le cadre de l'atténuation et de l'adaptation; ceci est particulièrement crucial pour les initiatives qui ont un long horizon prévisionnel (GIEC, 2007).

L'adaptation et l'atténuation peuvent parfois être interdépendantes. L'observation des vagues de chaleur, par exemple, qui deviennent plus fréquentes et plus intenses et qui ont mis le réseau électrique dans une situation précaire à cause de la demande importante en refroidissement peuvent aboutir à ce que l'autorité provinciale en matière d'énergie mette en valeur l'exploitation de parcs éoliens supplémentaires, d'autres énergies renouvelables et étende les systèmes de refroidissement des eaux lacustres pour les immeubles de bureaux. Ces mesures sont une réaction contre le réchauffement qui a déjà été confirmé (et sont donc adaptatives), mais il se peut qu'elles réduisent les émissions de GES dans leur ensemble si elles offrent un substitut à la génération de combustible fossile actuel et finissent par atténuer ainsi le changement climatique. Les mesures adaptatives peuvent être à double fin ; il peut s'agir de mettre en valeur une capacité adaptative ou une certaine souplesse dans les projets ou bien de réaliser une action adaptative (Willows et Connell, 2003).

³ Le GIEC offre quelques définitions utiles en matière d'adaptation. On distingue *l'adaptation anticipative* (appelée également adaptation proactive) qui a lieu avant que les effets du changement climatique soient observables et *l'adaptation planifiée*. Cette dernière résulte d'une décision stratégique délibérée, basée sur une perception claire que les conditions ont changé ou sont sur le point de changer et qu'il convient de prendre des mesures pour revenir, s'en tenir ou parvenir à la situation souhaitée. Les *avantages de l'adaptation* sont les coûts évités ou les avantages accumulés, après l'adoption et l'implantation des mesures adaptatives alors que les *coûts d'adaptation* sont les coûts engagés par la planification, la préparation, la facilitation et l'implantation des mesures adaptatives, y compris les coûts de transition. (GIEC, 2007, 869).

Les mesures d'adaptation prennent des formes diverses telles qu'un ajustement physique, un changement technologique ou la modification d'un règlement ou d'un comportement et ceci peut se produire à l'échelle d'un individu, d'une communauté ou du gouvernement (Auld, 2008; Auld *et al.*, 2007; Canada GC, 2007). Les facteurs d'échelle chronologique sont tout aussi importants puisque les réponses adaptatives sont influencées par les changements actuels du climat ou par les scénarios modélisés prévoyant les changements (Canada GC, 2007).

L'adaptation anticipative tend à produire des coûts réduits à long terme et réciproquement, les méthodes réactionnelles tendent à produire des coûts plus élevés et à être particulièrement inefficaces et préjudiciables surtout quand les dommages sont irréversibles. L'extinction d'espèces ou la fonte des glaciers alpins en sont des exemples concrets (GIEC, 2007). Plusieurs différentes formes anticipatives d'adaptation sont de nos jours exercées dans le monde entier pour réduire la sévérité du changement climatique. Au Canada, plusieurs exemples de formes anticipatives de mesures d'adaptation sont en cours, dont par exemple, les chasseurs inuit qui utilisent des systèmes de positionnement global pour faciliter la navigation quand le temps est aléatoire, les stations de ski qui développent d'autres activités visant à diversifier leur assise économique, l'industrie du bois d'œuvre qui extrait le plus de bois de qualité marchande possible affecté par le dendroctone du pin ponderosa, le gouvernement du Québec qui introduit des règlements limitant les développements le long des zones côtières et l'instauration des mesures de conservation des eaux en Saskatchewan (Canada GC, 2007).

Il est important de bien faire la distinction entre l'adaptation et la *capacité d'adaptation*. La capacité d'adaptation⁴ est la capacité d'un individu, d'une communauté, d'une industrie ou d'un pays à implanter des mesures d'adaptation au changement climatique qui sont influencées par les structures institutionnelles, l'accès à des ressources éducatives, technologiques et financières (GIEC, 2007) ainsi qu'à des cadres décisionnels efficaces. On considère que le Canada a une très grande capacité d'adaptation alors que beaucoup de pays en voie de développement ont tendance à avoir une faible capacité d'adaptation (Canada GC, 2007). De même, la capacité d'adaptation peut différer dans le même pays entre les zones rurales et urbaines et certains segments de la population, ce qui est exemplifié dans le contexte canadien, par les groupes autochtones et non autochtones. Une grande capacité d'adaptation ne correspond pas forcément à l'implantation de mesures d'adaptation appropriées ou essentielles.

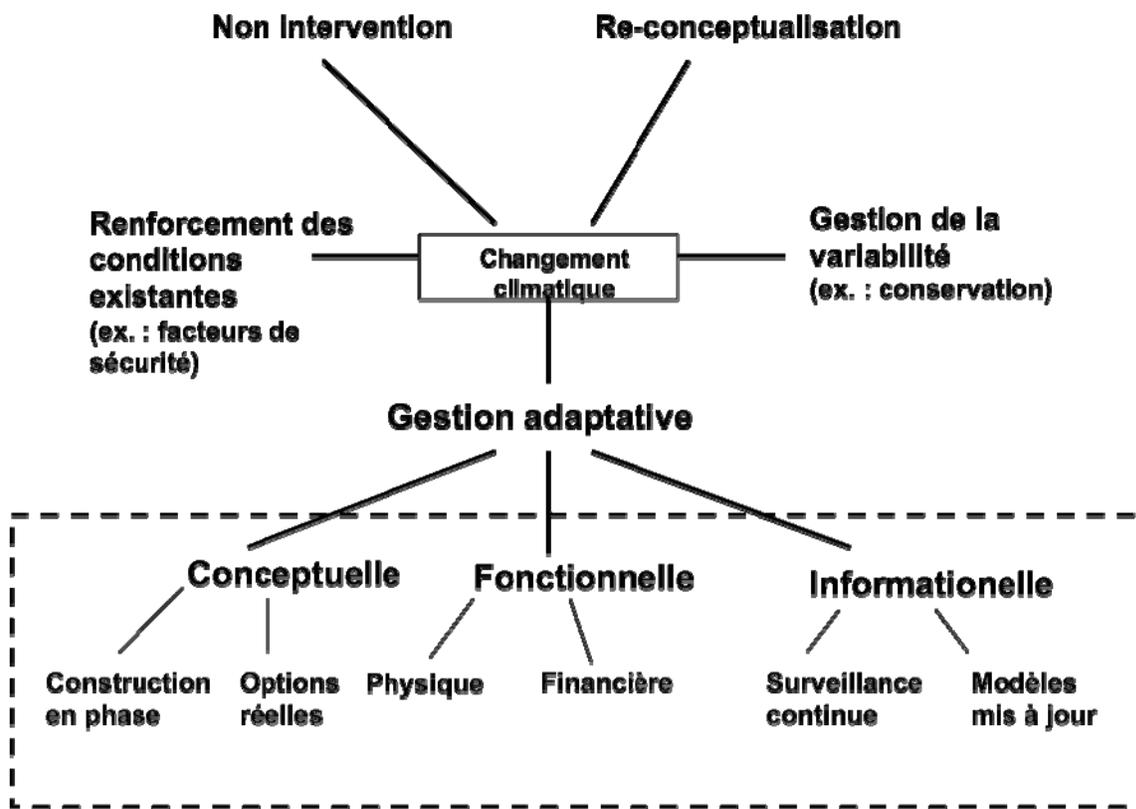
Dans certains pays et certains secteurs industriels, les faibles capacités d'adaptation peuvent contraindre à implanter de mesures d'adaptation qui ne sont pas toujours suffisantes face au changement climatique. Une restriction additionnelle importante est liée à la disponibilité des outils d'aide à la décision pour choisir convenablement entre les initiatives d'adaptation. Le processus de décision concernant les stratégies

⁴ Le GIEC la définit aussi comme « la capacité d'ajustement d'un système face aux changements climatiques (y compris à la variabilité climatique et aux extrêmes climatiques) afin d'atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités ou de faire face aux conséquences" (GIEC, 2007, 869).

d'adaptation au changement climatique représente un défi considérable puisque les incertitudes sont imposantes et qu'il existe une grande possibilité de mal employer les ressources. Il faut tenir compte de multiples facteurs tels que la vraisemblance de l'effet prévu et les moyens (technologiques ou financiers) de mise en œuvre de la stratégie avant de décider quelles sont les options d'adaptation les plus viables. L'intégration des mesures d'adaptation dans le concept et la réalisation du projet peut atténuer les coûts à long terme associés au changement climatique et peut même révéler des domaines d'opportunités. Réciproquement, surestimer les effets actuels peut hausser les coûts d'un projet (Canada GC, 2007).

La figure 4.1 classe les méthodes anticipatives d'adaptation selon la façon dont un promoteur tente d'adapter son projet au changement climatique. On discute de chacune d'elles dans les sous-sections suivantes.

Figure 4.1. Méthodes générales d'adaptation au changement climatique durant la conception et l'exploitation d'un projet



4.1 La non-intervention

Non intervenir fait référence, dans ce contexte, à la conception d'un projet qui n'est pas influencée par les facteurs du changement climatique. Il s'agit bien d'un plan

d'action possible, mais non d'une méthode réelle d'adaptation. L'incapacité à prédire les scénarios climatiques futurs, le manque de confiance dans les modèles climatiques, les lacunes en connaissance des processus climatiques, la croyance que les effets du changement climatique ne se feront surtout sentir qu'après la durée de vie du projet peuvent tous encourager à opter pour cette solution.

4.2 Le renforcement des concepts existants

En ingénierie, la pratique est de prévoir des charges ou des conditions plus importantes que la normale (ex. : dans l'application des coefficients de sécurité) dès la conception. Cette pratique s'avère utile contre les défaillances de systèmes, surtout quand elles ne sont pas faciles à caractériser ou à quantifier. Les piliers du Pont de la Confédération, par exemple, avaient été conçus au cas où le niveau de la mer s'élèverait d'un mètre pour tenir compte tout spécialement des inquiétudes au sujet du changement climatique.

4.3 La gestion de la variabilité

On prévoit que le changement climatique augmentera la variabilité de certains paramètres (ex. : l'intensité des orages). La gestion de la variabilité signifie qu'il faut prendre des mesures, dès la conception et durant l'exploitation du projet, qui augmentent la capacité de ce dernier à tenir compte de l'augmentation de la variabilité. Un réservoir hydroélectrique, par exemple, pourrait être conçu pour gérer les courants de déversement provenant d'orages plus forts. Un autre exemple est celui des canicules plus fréquentes et prolongées causant une augmentation de la variabilité de la demande en électricité qui pourrait être satisfaite en générant une capacité de pointe supplémentaire. Au lieu d'augmenter la capacité du projet à gérer la variabilité croissante du climat, on peut modifier les effets de la variabilité du projet en prenant des mesures de conservation (ex. : installation de systèmes efficaces de refroidissement ou augmentation des prix) capables de réduire les effets de l'augmentation de la variabilité (ex. : demandes moyennes et de pointes plus faibles).

4.4 La re-conceptualisation du projet

Ceci implique de repenser la façon dont le projet a été conçu, construit et exploité pour réduire grandement la vulnérabilité du projet par rapport au climat, en tenant compte d'éléments de concept jusqu'à présent inusités ou inconnus. Le mouvement d'abandon des méthodes classiques de refroidissement des tours de bureaux vers l'adoption de la recirculation des eaux lacustres de grands fonds et les changements architecturaux tels que les toits verts est un exemple de re-conceptualisation. La re-conceptualisation est prometteuse, spécialement à moyen et à long terme.

4.5 La gestion adaptative

La *gestion adaptative* est une autre stratégie d'adaptation, couramment appliquée dans le secteur des ressources naturelles. Le principe fondamental de la gestion

adaptative est la souplesse. Étant donné qu'on manque de connaissances et d'informations dans ce cas au sujet du changement climatique, il peut être difficile, coûteux et peu pratique de concevoir et de mettre en œuvre la stratégie d'adaptation appropriée. On adopte le principe qu'il vaut mieux prendre les mesures nécessaires une fois que « l'apprentissage par la pratique » a généré suffisamment d'expérience (Lee, 1999). La gestion adaptative est particulièrement utile dans le contexte du changement climatique puisqu'il existe une grande incertitude quant à la prédiction des scénarios climatiques et aux résultats futurs (Hauser et Possingham, 2008). À défaut, la gestion adaptative peut être jugée comme un moyen de retarder le problème à une date ultérieure (Lee, 1999). Cette méthode, illustrée à la figure 4.1 est divisée en trois sous-catégories : informationnelle, fonctionnelle et conceptuelle

La souplesse informationnelle

La *surveillance continue* est une stratégie délibérée visant à obtenir des données d'observation sur la façon dont se produisent les changements induits par le climat. Elle est prérequis pour la plupart des méthodes souples. La conception modulaire et étagée (décrite ci-dessous) repose sur des données acquises avant l'ajout de nouveaux éléments et l'initiation des phases du projet. La surveillance continue procure aussi des données précieuses qui éclairent l'exploitation d'un projet ; elles peuvent éclairer la politique des consignes d'un réservoir de barrage en fonction des besoins en amont comme en aval (alimentation en eau, électricité, navigation, irrigation, etc.) ou en fonction du climat et de l'hydrologie locale. De tels renseignements facilitent la mise à jour des modèles de décision (spécialement les scénarios et la probabilité des événements). Le sondage des EE dans cette étude indique que les promoteurs de projets planifient souvent de compter sur la surveillance continue pour gérer le changement climatique. L'approche attentiste exige au minimum une bonne capacité de collecte et d'interprétation de données.

La souplesse fonctionnelle

La souplesse fonctionnelle met l'accent sur l'adaptation au changement climatique au niveau du projet, à la phase postérieure à la construction. Il existe deux catégories générales : la souplesse dans l'exploitation d'éléments physiques (machinerie, le débit de traitement, le roulement des postes de travail, etc.) et celle des instruments financiers.

La souplesse fonctionnelle est liée à l'utilisation des éléments d'actif du projet et aux règles décisionnelles gouvernant leur utilisation. Le projet d'aménagement hydroélectrique de Lower Churchill (2009), par exemple, propose d'adapter la variation de l'écoulement au moyen de modifications fonctionnelles telles qu'une utilisation plus fréquente d'un chenal marginal ou d'augmenter la capacité des turbines en cas de hausse des précipitations.

Les instruments financiers transfèrent le risque pécuniaire d'un projet pour mieux protéger la solidité financière de ce projet. Protéger l'essentiel d'un projet contre

certaines pertes liées au climat aide les promoteurs du projet et les parties intéressées à s'adapter aux nouveaux scénarios en assurant que les ressources financières sont disponibles s'il faut prendre rétroactivement des mesures urgentes coûteuses.

Le moyen classique de négocier certains risques est de prendre une assurance qui consiste essentiellement à faire accepter les risques par une autre partie en échange d'une prime. On peut, par exemple, prendre une assurance qui couvre des pertes plus importantes que les risques actuels (ex. : l'affaissement d'un bâtiment causé par une surcharge due au vent plus violent), ou que les risques causés par le changement climatique (ex. : déversement de pétrole dû à une rupture de canalisation causée par la fonte du pergélisol).

Les dérivés financiers tels que les options et les échanges sont essentiellement des outils de gestion du risque qui déplacent les risques vers ceux qui ont intérêt à prendre des risques, tels que les investisseurs de la bourse des marchandises. Les producteurs et les consommateurs du secteur énergétique emploient généralement ces dérivés pour circonvier la chute et la hausse exagérées des prix quand on prévoit une grande volatilité de ces derniers. La crise énergétique californienne de 2000 à 2001 illustre comment la robustesse des systèmes, le climat et la couverture financière ont tous contribué à créer une situation particulièrement grave alors que l'état amorçait sa déréglementation. La canicule combinée à la sécheresse dans les états du nord-ouest avait entraîné une hausse de la demande en électricité ce qui en a compromis l'alimentation. Les prix ont flambé en réaction à la pénurie du marché et certains services publics ont été obligés de payer des prix au comptant élevés pour le gaz naturel et sont rapidement devenus insolvable. Seuls ceux qui avaient signé des contrats d'achat à long terme ou qui possédaient des instruments de couverture dans le marché du gaz ont pu éviter la banqueroute.

La souplesse conceptuelle

La souplesse axée sur la conception signifie qu'il faut initialement faire l'effort conscient d'incorporer les coûts connexes au concept d'un projet qui nécessitera des modifications futures quand se produira le changement climatique. Les digues de protection contre les inondations construites avec des fondations supplémentaires en sont un exemple; des murs de soutènement pourront y être édifiés au cours du temps alors que l'intensité et la fréquence des inondations augmentent. C'est ce que signifie essentiellement la notion d'*options réelles*. Comme ce nom le suggère, ces options ressemblent aux options du secteur financier avec lesquelles un investisseur achète le droit, mais non l'obligation d'acheter ou de vendre une sécurité particulière à un prix donné (à une certaine date ou avant cette date). L'idée d'option d'achat, par exemple, signifie que le détenteur de l'option a le droit d'acheter une action au prix établi (de lever de l'option) à une date spécifique. Si le prix de l'action est plus élevé sur le marché que le prix de lever de l'option, il est profitable d'exercer le droit d'acheter et de vendre ensuite l'action au prix plus élevé du marché. Si la valeur marchande demeure moins élevée que le prix de lever de l'option, on n'exerce pas le droit

d'acheter. Dobes (2008) offre plusieurs exemples d'options réelles dans le contexte du changement climatique.

Dans le contexte de projets d'ingénierie, une option réelle représente la possibilité de construire des capacités supplémentaires ou d'entreprendre d'autres modifications du concept alors que les conditions changent et que plus d'informations sont disponibles. L'option permet au décideur d'éviter ou de retarder quelques engagements dans le temps présent et d'attendre pour voir quel sera l'investissement final approprié. La mise en vigueur progressive de l'augmentation de capacité est un exemple courant de projets d'ingénierie.

La conceptualisation progressive permet aux investisseurs d'engager moins de ressources en capital dans le projet à un moment donné ce qui rend le projet plus facile à financer (et peut-être plus facile à réaliser). Elle minimise les dépenses qui pourraient ultérieurement se révéler inutiles. Elle peut, cependant, entraîner les coûts initiaux (consistant essentiellement du prix de l'option) d'étude supplémentaire du concept, de capacité de rénovation de composantes ainsi que de perte potentielle des avantages d'économie d'échelle si le plein rendement venait à se réaliser.

La conceptualisation progressive peut aussi être avantageuse d'un point de vue environnemental : si on ne construit qu'en fonction des besoins, on évite alors de construire inutilement et on réduit le gaspillage qui en découle (consommation de matériaux et d'énergie, GES, etc.). De Neufville (2002) décrit l'analyse économique des compromis entraînés par les options réelles qui tiennent compte de la valeur-temps de l'argent.

5. L'examen des EE de projets canadiennes

Ce rapport examine la façon dont les EE de projets canadiennes tiennent compte du changement climatique. On a, plus exactement, cherché à savoir non seulement comment les EE abordent le problème des répercussions potentielles du projet sur le climat, mais aussi quelles mesures d'adaptation ont été envisagées et comment ces dernières ont été déterminées. Quinze EE, effectuées entre 2000 et 2009, ont été examinées dans différents secteurs industriels dont le secteur hydroélectrique, minier, de restauration, des pipelines, nucléaire et des projets de parcs éoliens pour lesquels on prévoit que le changement climatique posera des problèmes. Cet examen s'appuie sur l'examen similaire de 11 EE effectué par Lalani (2003) de 1992 à 2000 et qui est résumé par Byer *et al.* (2004). Les 15 EE qui ont été examinées incluent:

Les projets hydroélectriques

- Le projet d'aménagement hydroélectrique du cours inférieur de Churchill (2009)
- Le projet d'expansion hydroélectrique de Waneta (2007)
- Le projet de complexe hydroélectrique de la Romaine (2007)
- Le projet hydroélectrique de Dunvegan, Glacier Power Ltd. (2006)

Les projets de gazoducs

- Le projet de gazoduc Emera Brunswick (2007)
- Le projet gazier Mackenzie (2004)

Les projets miniers, de forage et de restauration

- Le projet de mine d'or et de cuivre Prosperity (2009)
- Le projet de forage intercalaire de puits de gaz peu profonds dans la réserve de faune de Suffield par Encana (2007)
- Le projet des sables bitumineux Kearl (2007)
- Le projet d'assainissement des étangs bitumineux et des sites de fours à coke de Sydney (2006)
- Le projet de la mine de charbon Cheviot (2000)

Le projet nucléaire

- Le projet Bruce Power (2008)

Les projets de parcs éoliens

- Le projet du parc éolien Summerside (2008)
- Le projet du parc éolien de l'île Wolfe (2007)
- Le projet du parc éolien de Melancthon Grey (2005)

Seuls deux de ces projets, le projet de la mine de charbon Cheviot (2000) et le projet de gazoduc Emera Brunswick (2007), ne font aucune mention du changement climatique. Ceci indique une nette amélioration en comparaison de ce que Lalani (2003) avait observé indiquant que six EE sur onze n'avaient fait référence à aucun aspect du changement climatique. Bien que la majorité des 15 EE de cette étude fassent référence aux effets potentiels du changement climatique sur le projet, elles concluent en règle générale que ces conséquences auront peu d'effet sur la conception du projet ou son exploitation. Deux explications avaient été couramment offertes : les effets du changement climatique se produiront après la durée de vie du projet et il y a simplement trop d'incertitude sur les prédictions liées au changement climatique pour être en mesure de les intégrer adéquatement à la conception du projet.

Les sous-sections suivantes soulignent comment ces EE spécifiques à un secteur ont traité de l'adaptation au changement climatique et, le cas échéant, comment ont été prises les décisions concernant l'adaptation.

5.1 Les projets hydroélectriques

Les effets du changement climatique sur les projets hydroélectriques varient selon l'endroit où se situe l'initiative au Canada. On prévoit un réchauffement général du climat canadien et un changement dans la configuration des précipitations qui finiront par affecter le débit fluvial et le niveau des lacs (Canada GC, 2007). Ces changements affecteront la production ou l'approvisionnement en hydroélectricité et seront amplifiés par la modification de la demande. Faire face à la demande énergétique de pointe pourrait devenir problématique dans l'Ouest du Canada, par

exemple, quand survient la fonte des glaciers causant l'étranglement des évacuations fluviales ; le tout exacerbé par l'augmentation du nombre et de l'ampleur des canicules finirait par causer une hausse de la demande en électricité pour la climatisation de l'air (Canada GC, 2007). Le changement climatique influence la conception, l'exploitation et l'entretien des installations hydroélectriques de plusieurs façons dont le stockage et l'approvisionnement d'eau, les inondations, le débit fluvial (plus élevé ou plus faible) et le régime de glaces ; tous étant des facteurs dont il faut tenir compte durant les EE (GIEC, 2001; Glacier Power Ltd., 2006).

Les quatre projets hydroélectriques d'EE traitent tous du changement climatique, de ses répercussions et de la façon dont l'initiative contribue à la réduction des gaz à effet de serre. Les rapports font souvent abstraction de la gravité des conséquences du changement climatique dû soit au degré élevé d'incertitude sur les prévisions climatiques futures soit à l'allégation des promoteurs de projets que les conséquences du changement climatique n'affecteront tout simplement pas leur projet. Un sentiment commun à tous les rapports, par exemple, est illustré dans l'EE du projet hydroélectrique de la Romaine dans lequel on déclare qu'il « est sans doute prématuré d'établir des stratégies d'adaptation » (2007, Vol. 7, Sec. 49, p. 11). On peut quand même retenir plusieurs leçons de ces rapports sur la façon dont l'EE intègre le changement climatique et les mesures d'adaptation dans l'évaluation des projets hydroélectriques.

Une préoccupation importante liée aux projets hydroélectriques est de maintenir la capacité de stockage et d'approvisionnement. Le GIEC (2001; 2007) et le GC (2007) estiment que la meilleure mesure d'adaptation consiste à étendre la capacité de réservoir en augmentant la zone de stockage et le volume ou en construisant des unités de stockage additionnelles. Le GC (2007) explique, par exemple, que la hausse de la fonte des neiges d'hiver au nord du Canada aboutira à une réduction de la réserve naturelle de neige du réservoir et que la capacité de stockage devra être augmentée. La recommandation du GC consiste à élever la hauteur du barrage où, si ce n'est pas faisable, de construire une unité de stockage additionnelle. L'EE du projet Glacier Power Ltd fait valoir qu'un réservoir capable d'entreposer au moins 1,5 année de débit sera suffisant (2006, Vol. 2, Sec. 14). Ce réservoir pourrait pourtant se révéler insuffisant puisque le GC (2007) recommande de redéfinir la crue de projet, à savoir, l'inondation la plus importante que les installations ainsi conçues peuvent contenir. Des méthodes d'adaptation additionnelles assurant l'approvisionnement énergétique pourraient être intégrées en améliorant les prédictions et les activités de gestion. Le projet hydroélectrique de la Romaine, par exemple, vise de mieux s'adapter aux besoins évolutifs du stockage en améliorant la qualité des prévisions relatives à l'approvisionnement et à la demande énergétique et en améliorant les connaissances au sujet des changements relatifs aux précipitations et aux températures. Le projet fait encore valoir que l'adoption des stratégies d'adaptation s'effectuera parallèlement à l'acquisition de meilleures connaissances sur le changement climatique (2007, Vol., 7 Sec. 49).

La crainte des inondations est toujours présente dans les projets hydroélectriques et on prévoit une augmentation de la fréquence et de l'intensité de conditions météorologiques exceptionnelles. Plusieurs stratégies d'adaptation, proposées par le GIEC (2001; 2007), consistent à élever les digues de défense contre les inondations et à construire un bassin versant de protection à la source, réduisant ainsi le débit de crue et les besoins en systèmes dès la conception, ceci pour contenir les crues exceptionnelles des cinq prochaines années. Dans le même ordre d'idées, le GC (2007) suggère de redéfinir la crue de projet à laquelle doivent résister le barrage et ses installations conçus et construits à cet effet. Toutes les EE hydroélectriques examinées traitent du problème d'inondations, mais elles ne font pas forcément référence au changement climatique. L'EE du projet d'expansion hydroélectrique de Waneta intègre dès la conception, la théorie qu'il y aura une inondation dans une période de 200 ans et déclare qu'en cas de conditions météorologiques exceptionnelles « la centrale serait inondée, mais non menacée. » (2007, Part E, Sec. 1, p. 161). Le projet d'aménagement hydroélectrique du cours inférieur de Churchill applique le principe de la crue maximale probable à la conception de ces installations de production électrique. Ce principe est décrit comme la crue la plus importante possible et elle est rare statistiquement. Le barrage a été conçu pour résister, mais aussi pour surpasser le principe de crue maximale probable ; il a été conçu pour résister à plus de trois fois le courant maximum jamais enregistré depuis 28 ans. Les auteurs de l'EE du cours inférieur de Churchill se sont ainsi assurés que les installations sont conçues pour affronter tous les changements climatiques futurs pouvant impliquer des inondations (2009, Vol. 1, Part A, Sec. 10.5.1.2). Enfin, l'EE du projet de complexe hydroélectrique de la Romaine déclare que : « L'établissement des normes de conception repose déjà sur des conditions climatiques extrêmes et ces conditions sont à ce point maximisées que les effets possibles de changements climatiques ne pourraient avoir que des effets négligeables sur le dimensionnement sécuritaire des ouvrages. » (2007, Vol. 7, Sec. 49).

Les variations du régime d'écoulement ont le potentiel d'affecter la production hydroélectrique et de compromettre à son tour la réponse à la demande en électricité; les mesures d'adaptation sont cruciales pour assurer l'approvisionnement continu en énergie. Le GIEC (2007) déclare que l'amélioration des prévisions saisonnières peut aider à compenser certains changements hydrologiques liés au changement climatique. Cette amélioration aurait pour conséquence de permettre la gestion d'entités de prévision de changement de débit. Bien que les EE reconnaissent qu'il est vraisemblable que les changements de débit se produiront, elles tendent à être optimistes. Le projet de Waneta, par exemple, fait directement référence aux modifications du débit causées par le changement climatique et maintient que ces changements du régime hydrologique aboutiront à des débits de pointe plus précoces, à des périodes de débit minimum plus longues et à des débits hivernaux accrus qui finiront par affecter la production électrique. Il déclare néanmoins, que : « Ceci ne veut pas dire nécessairement que la viabilité du projet sera affectée parce que les changements climatiques seront ressentis dans tout le système et dans de telles conditions que le prix de l'électricité augmentera » (2007, Part E, Sec. 1, p.161). Par conséquent, aucune mesure d'adaptation n'a été envisagée. Glacier Power Ltd a

reconnu l'existence des fluctuations de débit (non forcément dues au changement climatique) et a conçu ses ouvrages de tête de façon à ce qu'ils puissent gérer les conditions de crue maximale probable et de débit faible (2006, Vol. 3, Sec. 3.2.2). Enfin, L'EE du cours inférieur de Churchill propose d'adapter les variations de débit à l'aide de la « gestion adaptative ». Elle signale que, par exemple, le débit dû aux précipitations accrues exigerait l'utilisation plus fréquente du chenal marginal ou le fonctionnement à plus grande capacité des turbines (2009, Vol. 1, Part A, Sec. 10.5.1.6).

L'EE exige de traiter des effets que le projet aura sur le régime de glaces des rivières puisqu'il s'agit d'un élément environnemental important (Glacier Power, 2006). Glacier Power évalue en profondeur comment le projet affectera le régime de glaces; il examine différents scénarios climatiques futurs afin de déterminer les implications des changements dans la couche de glace. Son évaluation se limite aux modifications de la température de l'air parce qu'il estime que les changements dans les précipitations sont trop incertains. Les scénarios climatiques suivants sont pris en considération : les années 2020, 2050, 2080 et une variation de températures de 1 à 2 degrés C à court terme et de 3 à 5 degrés C à long terme. Il en conclut dans l'ensemble qu'il n'y aurait pas de différences importantes dans le régime de glaces dans les scénarios « sans le projet » et « avec le projet » (2006, Vol. 4, Sec. 4.7.5.11). L'EE conclut qu'« un réchauffement climatique affectera le régime de glaces de la rivière de la Paix sans toutefois affecter l'exploitation du projet » (2006, Vol. 3, Sec. 3.11.4, p. 54).

Enfin, toutes les évaluations, à l'exception de l'EE du projet d'aménagement hydroélectrique Waneta, comprennent une section importante sur le changement climatique et ses effets potentiels sur l'environnement et le projet. L'EE de Glacier Power admet que le réchauffement climatique accompagné d'une hausse des précipitations peut influencer le débit de la rivière et le régime de glaces et pourtant il déclare que ces changements n'affecteront pas l'exploitation du projet principalement à cause de la capacité de stockage du Lac Williston voisin (2006, Vol. 2, Sec. 14). L'EE du projet d'aménagement hydroélectrique de la Romaine utilise 25 différents scénarios climatiques (allant jusqu'en 2050) comportant des changements de température de 1 à 4 degrés C (printemps, été et automne) et de 2 à 7 degrés C en hiver. Des variations dans les précipitations allant de -10 % à +30 % sont intégrées dans les modèles. Les réalisateurs du projet en ont conclu que la grande gamme d'estimations hydrologiques et climatiques crée trop d'incertitude et rend trop complexe l'adoption de stratégies d'adaptation. Ils proposent donc d'adopter des stratégies d'adaptation au fur et à mesure que se développent les connaissances sur le changement climatique, ce qui consiste à adopter des stratégies de gestion adaptative qui sont essentiellement réactives (2007, Vol. 7, Sec. 49).

Dans le même ordre d'idées, l'EE du cours inférieur de Churchill utilise plusieurs simulations de modèles visant à évaluer les effets du changement climatique sur la rivière lors d'une augmentation du niveau de la mer de 0,5 m. Pour chaque scénario, le débit fluvial moyen finit par augmenter. Elle en conclut néanmoins que le concept actuel du projet tient suffisamment compte du changement climatique et que la

faisabilité du projet dans son ensemble n'en sera pas affectée (2009, Vol. 1, Part A, Sec. 10.5.1.6, p. 319). Aussi, les promoteurs du projet maintiennent qu'il n'est pas faisable de mettre en œuvre des mesures d'adaptation supplémentaires pour des raisons d'incertitude. Ils font valoir qu'il suffit d'intégrer le changement climatique aux méthodes de gestion et d'exploitation pour s'adapter à n'importe lequel des scénarios climatiques (2009, Vol. 1, Part A, Sec. 10.5.1.6).

Toutes les EE hydroélectriques tiennent compte du changement climatique dans une certaine mesure. Les EE discutent de la façon dont le projet aidera à atténuer le changement climatique en produisant de l'énergie d'une source propre et renouvelable. Elles décrivent aussi les changements vraisemblables dans une région donnée et comment ces derniers affecteront leur projet. Trois EE sur quatre procurent un résumé détaillé des modèles climatiques de prédiction des changements. Le consensus est que les changements climatiques auront peu d'effet sur le projet et que le projet a été convenablement conçu pour s'adapter à de tels changements. De plus, les EE stipulent que c'est en poursuivant la recherche et la surveillance continue des effets du changement climatique que l'on comprendra mieux ces derniers et qu'on les intégrera mieux à la gestion et à l'exploitation du projet ; cette démarche pouvant être un segment de la stratégie d'adaptation.

5.2 Les projets de pipelines

On prévoit que le changement climatique affectera d'autres infrastructures telles que celles des pipelines surtout dans les régions du nord où on prévoit que les changements dans la cryosphère (pergélisol, neige et glace) seront prononcés (Canada GC, 2007). Un réchauffement climatique causera la fonte du pergélisol et l'affaissement des sols ce qui mettra en danger la structure et la stabilité des pipelines. Une augmentation du nombre d'évènements extrêmes et graves tels que les inondations et les fortes pluviosités peuvent aussi produire une érosion et en rompre l'infrastructure (GIEC, 2007). Il faut tenir compte de ces effets dans le concept et le maintien des projets de pipelines.

Les deux EE de projets de pipeline, le projet gazier Mackenzie (2004) et le projet de gazoduc Emera Brunswick (2007) ont été examinés. L'EE du projet gazier Mackenzie comprend une analyse approfondie du changement climatique et de la façon dont le projet sera vraisemblablement affecté par de futures modifications ; inversement, le document sur le projet de gazoduc Emera Brunswick, ne fait aucune référence au changement climatique. Le rapport sur le projet gazier Mackenzie applique plusieurs scénarios climatiques visant à évaluer les effets sur le projet, sa conception et son exploitation. Les différents scénarios adoptés ont été créés par un sous-groupe de travail plurilatéral composé d'experts dans le domaine qui ont sélectionné les scénarios les plus appropriés. L'EE du projet gazier Mackenzie conclut que les effets du changement climatique ne seront pas importants durant la durée de vie du projet et que la surveillance continue et la gestion suffiront à y faire face. Plusieurs mesures d'adaptation à la conception et durant l'exploitation ont néanmoins été identifiées dans

le rapport, spécialement celles concernant le tassement dû au dégel et à l'érosion ainsi que les événements extrêmes tels que les inondations.

Le GIEC (2001; 2007) ne donne pas de détails importants sur les mesures d'adaptation concernant les projets d'infrastructure tels que les pipelines ; il suggère seulement que de telles structures devraient être conçues différemment. Le GC (2007) fait plusieurs recommandations, spécialement en référence au tassement dû au dégel signifiant qu'il faut, premièrement, éviter les sols sensibles au dégel et deuxièmement, concevoir l'infrastructure de façon à préserver le pergélisol. On accomplit la préservation du pergélisol en isolant et en induisant le refroidissement artificiel au moyen d'un thermosiphon ou en assurant que le sol demeure gelé en incorporant des remblais de convection de l'air. Une autre solution serait d'enlever et de remplacer le pergélisol avec des matériaux non gelés et stables avant de construire le pipeline ou bien de commencer la construction après avoir ôté la végétation et après que le sol soit tassé (Canada GC, 2007). Le projet Mackenzie a pris plusieurs mesures contre le tassement dû au dégel lié au changement climatique. Afin d'assurer que les températures d'exploitation du pipeline ne causent pas le dégel le long de la structure, par exemple, on l'a situé au nord d'Inuvik où la température reste au-dessous de -1° C. D'autres mesures consistent à construire les installations sur pieux ou sur des coussins isolés pour possiblement éviter que la température du bâtiment fasse fondre le pergélisol environnant (2004, Vol. 5, Part F, Sec. 14.1.2).

L'érosion causée par les événements extrêmes tels que les inondations, les vents violents ou l'eau augmente le risque de rupture ou de défaillance du pipeline. L'EE Mackenzie met en valeur plusieurs mesures minimisant la susceptibilité du pipeline à l'érosion : la construction du pipeline à 1,20 m ou plus de profondeur pour éviter l'érosion par la glace ou l'eau aux intersections, l'emplacement du pipeline assez éloigné de la berge du fleuve pour réduire l'exposition aux intersections et la réalisation des mesures de contrôle de l'érosion telles que la remise en végétation des sols et le détournement des eaux de surface, loin des voies de passage, vers des fossés transversaux (2004, Vol. 5, Part F, Sec. 14.1.2).

Les initiatives d'adaptation prises contre les inondations consistent à construire les installations de production de 2 à 3,5 m au-dessus du sol au moyen de coussins ou de plateformes élevées et à concevoir des installations de conditionnement du gaz sur barges pouvant résister à une élévation de 5 à 6 m du niveau d'eau. Les écoulements extrêmes et les fortes précipitations ont aussi un effet indésirable sur le projet. Afin de protéger contre ce danger, les dispositifs de commande de surface comme de sous-surface sont placés le long des voies de passage pour gérer les écoulements et des buses sont conçues pour résister à 150 % du débit maximum prévu (2004, Vol. 5, Part F, Sec. 14.2).

L'EE du projet Mackenzie a évalué les effets potentiels du changement climatique sur le projet en conjuguant 29 modèles différents de simulation et en incorporant plusieurs prévisions d'émissions de GES telles que soulignées dans les rapports du GIEC. Elle avait organisé un groupe de travail pour les parties intéressées composé de spécialistes d'Environnement Canada, d'organisations non gouvernementales et de

groupes autochtones du nord, en vue de créer plusieurs scénarios climatiques possibles. Ces scénarios indiquaient des changements futurs de températures allant de 3 à 6°C et une hausse des précipitations allant jusqu'à 11,8 % pour une durée de vie du projet de 30 ans. C'est en fonction de ces projections que l'EE a tenu compte des eaux souterraines, de l'hydrologie, de la qualité de l'eau, des poissons et de leur habitat, des sols, de la topographie et du pergélisol, ainsi que de la végétation et de la faune. Le rapport en a conclu que « Bien qu'il existe encore des incertitudes et que le changement climatique puisse affecter l'environnement du Nord au cours du temps, il est peu probable que les effets du changement climatique sur la durée de vie du projet changent les conditions de départ au point de devoir modifier l'évaluation des effets potentiels. » (2004, Vol. 5, Part F, Sec. 11.1.2, p. 1). Cette conclusion a été contestée par Environnement Canada (2005) qui a fait valoir que l'EE n'a pas correctement traité du changement climatique ni de la variabilité climatique. Environnement Canada a spécialement exprimé son inquiétude que l'EE aurait négligé les conséquences des extrêmes climatiques tels que les effets d'une succession de plusieurs années chaudes. Les promoteurs ont répondu que les simulations de modèles, la conception et la construction du pipeline ont suffisamment tenu compte de ces questions et que la surveillance continue ainsi que la gestion adaptative seront utilisées, à l'avenir, pour réduire tout risque ou dommage au pipeline (Environnement Canada, 2005).

5.3 Les projets miniers, de forage et de restauration

Le changement climatique aura des répercussions, à des degrés variés sur les projets miniers, de forage et de restauration selon le stade du projet, durant l'exploration, l'exploitation ou la remise en état des sites, qui se produisent selon des échelles chronologiques différentes. Au nord du Canada, par exemple, les changements dans la couche de glace et le pergélisol affecteront la synchronisation et la situation de l'exploration pétrolière (Canada GC, 2007). Durant l'exploitation minière du nord, la stabilité des amas de stériles et des bassins de résidus, établis dans des conditions de pergélisol, devra être surveillée. La sécheresse tout comme les fortes précipitations ont des conséquences sur l'infrastructure minière. Les bassins de résidus, par exemple, auxquels on rajoute souvent de l'eau pour éviter l'oxydation peuvent déborder et relâcher des contaminants en cas de fortes précipitations. Ces bassins peuvent aussi être affectés par une hausse des températures et l'évaporation qui exposent les résidus bruts et augmentent leur vulnérabilité à l'usure du temps (Canada GC, 2007).

Cinq EE de ces secteurs ont été examinés : le projet de la mine de charbon Cheviot (2000), le projet d'assainissement des étangs bitumineux et des sites de fours à coke de Sydney (2006), le projet de forage intercalaire de puits de gaz peu profonds dans la réserve de faune de Suffield par Encana (2007), le projet des sables bitumineux Kearl (2007) et le projet de mine d'or et de cuivre Prosperity (2009). Toutes les EE, à l'exception du projet de la mine de charbon Cheviot, abordent la question du changement climatique à un certain degré. Les EE du projet d'assainissement des étangs bitumineux et des sites de fours à coke de Sydney (2006, Sec. 5.8) et celle du projet de forage intercalaire de puits de gaz peu profonds par Encana (2007, Vol. 3,

Sec. 9.4) font valoir qu'elles ont tenu compte des répercussions du changement climatique, mais ne prévoient pourtant que des effets potentiels minimes à cause de la durée de vie du projet. Les rapports sur le projet des sables bitumineux Kearl et celui de la mine d'or et de cuivre Prosperity procurent des analyses plus approfondies et offrent des suggestions sur les mesures d'adaptation au changement climatique.

L'exploitation minière dans son ensemble a un effet sur l'hydrologie et les eaux souterraines et on s'attend à ce que ces changements soient amplifiés par le changement climatique. Le GC (2007) recommande de réduire la prise d'eau durant l'exploitation, de recycler les eaux traitées, d'établir une infrastructure qui déplace l'eau des bassins de résidus et des carrières pour leur utilisation en sous-surface. L'EE de la mine Prosperity (2009, Vol. 1, Sec. 9) propose de détourner l'eau par un canal au nord de la mine à ciel ouvert pour contrôler la réduction de production hydrologique. Il faut tenir compte des événements extrêmes tels que les inondations, les précipitations, les tempêtes de neige et la sécheresse dans la conception et la planification de l'exploitation des projets miniers, pétroliers et gaziers. Le projet d'assainissement des étangs bitumineux et des sites de fours à coke de Sydney (2006, Sec. 5.8) fait valoir que c'est pour tenir compte des conditions météorologiques exceptionnelles que l'exploitation est située à l'extérieur de toute zone potentielle d'inondation et que toutes les structures sont construites pour résister à des vents ayant la force d'un ouragan. Le projet de forage intercalaire de puits de gaz peu profonds par Encana (2007, Vol. 3, Sec. 9.2) déclare qu'il s'adaptera à une augmentation du nombre et de l'ampleur d'événements extrêmes en interrompant ou en modifiant les activités durant de tels événements.

L'EE de la mine Prosperity (2009, Vol. 1, Sec. 18) procure une analyse plus détaillée qui met en valeur plusieurs mesures d'adaptation en cas d'événements extrêmes. En cas de précipitations excessives, la conception du projet a intégré le volume de crue d'un orage de 72 heures, lequel est considéré comme suffisant pour gérer toute nette augmentation causée par le changement climatique. Les structures de gestion des eaux telles que les fossés et les bassins sont conçus pour résister durant une période de récurrence supérieure à la durée de l'exploitation de la mine (> 20 ans). L'effet du changement climatique sur les courbes de durées sera évalué et les nouvelles valeurs seront appliquées au système de gestion des eaux. En matière de sécheresse, l'EE maintient que les installations de stockage de résidus auront un volume minimum et une zone tampon dans des conditions moyennes. Les vents forts et l'excès d'eau peuvent causer des vagues dans les installations et à cet effet, la structure peut résister à des vagues dépassant le bassin de 1 m. Enfin, en cas de tempêtes de neige et de lourdes charges de glace, le bâtiment est conçu pour respecter les exigences du code de construction visant à soutenir la surcharge du toit dû à la neige et aux précipitations (sur la base d'une surcharge de neige en 50 ans).

Un élément important des projets miniers et pétroliers est la fin de phase d'activité qui exige la remise en état du site. Il est crucial de tenir compte du changement climatique puisque cette étape se produit toute à la fin du projet. L'EE des sables bitumineux Kearl tente d'intégrer, de manière considérable, le changement climatique futur dans ses activités de remise en valeur (2007, Vol. 7, Annexe 3). Fondé sur

l'examen de la documentation pertinente, sur les résultats de la modélisation du sol en fonction du climat et sur les études des interprétations liées à la remise en valeur des sols, le rapport met en valeur la façon dont les changements futurs du climat affecteront la composition et la distribution des sols et par conséquent les activités de remise en état. La modélisation des effets futurs sur la distribution et la composition des sols requiert une variété de modèles (ex. : le modèle climatique Hadley Center Coupled Model), les bornes supérieures des températures, les bornes supérieures et inférieures des précipitations, combinées aux différents scénarios du GIEC sur les émissions, pour produire des résultats et des recommandations. L'EE des sables bitumineux de Kearl propose de limiter les effets de la déshydratation des sols au moyen de matières biologiques de texture fine dans la première tranche d'un mètre de sol (2007, Vol. 7, Annexe 3) afin de réduire le potentiel de sécheresse du sol et de promouvoir la bonne croissance des forêts. La remise en état signifie qu'il faut rétablir les écosystèmes naturels antérieurs au projet ; elle reconnaît cependant que ceci n'est pas toujours possible à cause du changement climatique. De ce fait, le rapport déclare que la végétation sera adaptée au climat de l'époque (2007, Vol. 7, Annexe 3).

Trois EE sur quatre traitent du changement climatique. L'EE des sables bitumineux Kearl (2007, Vol. 4, Annexe 2B), en particulier, présente une analyse détaillée du changement climatique, de la contribution du projet aux émissions de GES et des effets probables des changements futurs sur l'initiative. Elle utilise de nombreux modèles et scénarios d'émissions, tels que ceux mis en valeur par le GIEC, qui ont ensuite été classés selon un processus de consultation multilatéral. À la fin du processus, elle utilise neuf modèles et scénarios illustrant les bornes supérieures de températures et les bornes inférieures et supérieures des changements dans les précipitations (2007, Vol. 4, Annexe 2B, Sec. 1.3). À l'aide de ces modèles, l'EE conclut que le changement climatique n'aura pas d'effets importants et que tout résultat imprévu sera atténué au moyen d'une surveillance continue et de la révision des plans de gestion. De même, l'EE de la mine Prosperity (2009, Vol. 1, Sec. 18) conclut que la sensibilité du projet au changement climatique sera nulle ou faible durant toutes ses phases (de la construction, de l'exploitation et de la fermeture).

5.4 Le projet nucléaire

On prévoit que les installations d'énergie nucléaire et leur exploitation subiront plusieurs répercussions dues au changement climatique. Le GIEC (2007) identifie la fonte du pergélisol et l'affaissement des sols comme un risque pour les installations nucléaires des régions du nord pouvant aboutir à des défaillances structurales. D'autres résultats néfastes sont à prévoir, tels qu'une défaillance totale à produire de l'électricité comme cela s'est produit en France, en été 2003, durant une vague de chaleur exceptionnelle qui a fini par interrompre l'approvisionnement en électricité. Cette interruption avait été causée par une combinaison de facteurs ; la hausse de la demande en électricité pour la climatisation et la hausse de la température des rivières devenues alors moins efficaces à refroidir les centrales nucléaires (GIEC, 2007).

On a examiné l'EE de Bruce Power (2008) comme un exemple sur la façon dont les projets nucléaires traitent du changement climatique. Un problème général des activités nucléaires est l'effet que l'initiative aura sur l'hydrologie et la qualité de l'eau dans la région et ce problème pourrait être exacerbé par le changement climatique ; ceci est inquiétant au niveau de l'exploitation de l'installation et du respect de l'intégrité environnementale. Le projet, situé au lac Huron, reconnaît que les changements dans les précipitations et de températures auront vraisemblablement des conséquences sur les conditions et les surfaces de la nappe du lac. Le rapport prétend, cependant, que l'augmentation de l'évaporation causée par la hausse des températures sera vraisemblablement compensée par une hausse des précipitations et que pour cette raison aucune mesure d'adaptation n'est requise (2008, Vol. 1, Sec. 6.6.2). À l'égard des phénomènes météorologiques violents, le rapport fait valoir qu'il a tenu compte des effets de tels phénomènes à la conception du projet et que le changement climatique ne devrait pas causer d'effets supplémentaires (2008, Vol. 1, Sec. 6.6.2).

Plusieurs questions concernant le changement climatique ont été posées durant le processus de consultation publique. Il y avait une certaine appréhension au sujet de l'option de refroidissement et on se demandait si on tiendrait compte du changement climatique dans le choix des méthodes. Le rapport a répondu que puisqu'un réchauffement climatique risque d'augmenter la température du lac, la mesure d'adaptation la plus appropriée serait d'intégrer des tours de réfrigération au projet (2008, Vol. 3, Annexe D).

Le rapport tient compte du changement climatique de manière extensive, dont les émissions de GES du projet, le potentiel de les atténuer et les effets que le changement climatique pourrait avoir sur le projet (2008, Vol. 2, Sec. 11). Il tient aussi compte des effets du projet sur les éléments environnementaux importants et il réévalue ces éléments dans le contexte d'un changement climatique. Il examine ensuite dans quelle mesure le projet affecte les éléments environnementaux importants dans un scénario climatique différent. En dépit de la profondeur de cette analyse, l'évaluation conclut dans chaque cas que : « Compte tenu de la comparaison entre les modèles de scénarios climatiques et ceux prédits lors de l'évaluation du projet de référence et de ses scénarios alternatifs, on prévoit que le projet ne produira aucun effet ou changement sur les prédictions environnementales futures. » (2008, Vol. 2, Sec. 11, p. 11.5). L'EE a, par conséquent, rejeté tout résultat néfaste et n'a procuré que des stratégies d'adaptation limitées. Elle finit par conclure qu'il n'y aura pas d'autres effets néfastes du changement climatique sur le projet ni son exploitation au cours de sa durée de vie de 60 ans.

5.5 Les projets de parcs éoliens

L'inquiétude croissante au sujet du changement climatique et de la production énergétique a renouvelé l'intérêt dans les formes renouvelables d'énergie telles que l'énergie éolienne. Les projets de parcs éoliens sont une stratégie climatique d'atténuation qui s'éloigne de la production énergétique causant des émissions de GES, mais leur concept et leur exploitation doivent pourtant traiter des effets du

changement climatique sur la stabilité structurale et sur la capacité à produire de l'électricité. Le GIEC (2007) prétend que les parcs éoliens, en particulier, doivent tenir compte de la situation des installations puisque la variabilité climatique peut modifier la configuration des vents.

On a examiné trois EE de projets de parcs éoliens : le projet du parc éolien de Melancthon Grey (2005), le projet du parc éolien de l'île Wolfe (2007) et le projet du parc éolien Summerside (2008). Chaque EE discute du changement climatique, du potentiel d'atténuation du projet et aussi de la façon dont l'initiative sera vraisemblablement affectée par le changement climatique. La plus forte appréhension concernant le changement climatique et les activités des parcs éoliens tend à se concentrer sur les phénomènes météorologiques extrêmes.

L'EE du projet du parc éolien de Melancthon Grey traite des phénomènes météorologiques extrêmes et prétend que les pales de rotor, la nacelle et la tour sont construites pour résister aux effets d'un orage de grêle violent. De plus, les pales s'arrêteraient de fonctionner en cas de lourdes charges de glace ralentissant la vitesse à 25 m/s (2005, Sec. 7.18). L'EE de l'île Wolfe déclare spécifiquement que selon les prédictions climatiques, la hausse des températures et des précipitations serait probablement accompagnée d'une augmentation de la vitesse des vents. Le projet a conçu ses pales en fonction de ces prédictions pour qu'elles s'extrait du vent durant les vents violents de façon à maintenir l'intégrité structurale de la turbine (2007, Sec. 7.21). En matière de l'élévation du niveau des mers, l'EE de Summerside reconnaît que l'augmentation de l'érosion pourrait avoir des effets néfastes sur les éléments d'actif pourtant il ne propose aucune mesure d'adaptation. Le rapport maintient que le programme de recherche et de surveillance continu sera établi de façon à intégrer convenablement des stratégies d'adaptation à une date ultérieure quand toute la complexité du projet sera alors mieux comprise (2008, Sec. 6.2).

5.6 Le mot de la fin

L'examen des quinze EE d'une variété de secteurs révèle que treize évaluations traitent du changement climatique à un certain degré et que plusieurs d'entre elles (telles que l'EE du projet des sables bitumineux de Kearl) procurent une analyse extensive qui utilise des modèles et des prédictions pour évaluer leur projet. Les EE concluent, dans l'ensemble, que les effets potentiels du changement climatique sur le projet seront minimes. McBeath (2003) aboutit à des résultats semblables à l'égard des systèmes d'infrastructure des transports en Alaska. L'EE du projet du parc éolien de Melancthon Grey (2005, p. 117) conclut : « On prévoit que les répercussions du projet sur le climat seront trop faibles pour causer des effets néfastes importants. » (Se référer aussi à Encana 2007, Vol. 3, Sec. 9.4, p. 9-3; Glacier Power 2006, Vol. 4, Sec. 4.7.5.2.11, p. 190; Waneta 2007, Part E, Sec. 1, p. 161).

Il existe deux explications possibles à la conclusion commune à ces promoteurs de projets. L'une est que la durée de vie de l'activité proposée se termine avant l'apparition des effets du changement climatique, tel que dans le cas de l'EE du projet d'assainissement des étangs bitumineux et des sites de fours à coke de Sydney :

« Compte tenu de la durée relativement courte de la période de construction et d'exploitation en jeu, la STPA ne prévoit pas que le changement climatique aurait des effets importants sur le Projet dans son ensemble ou sur l'incinérateur en particulier. » (2006, Sec. 5.8, p. 100).

De la même façon, l'EE du projet gazier Mackenzie déclare :

« On conclut que bien qu'il y ait encore des incertitudes et que le climat affectera l'environnement du Nord au cours du temps, il est peu probable que les effets du changement climatique sur la durée de vie du projet changent les conditions de départ au point de devoir modifier l'évaluation. (2004, Vol. 5, Part F, Sec. 11.1, p. 11-1) » (Voir aussi Bruce Power 2008, Vol. 2, Sec. 11, p. 11-22).

La seconde explication est que les promoteurs maintiennent qu'il y a soit un manque d'informations au sujet des changements de climat soit des incertitudes trop importantes quant aux modèles de prédictions. L'EE du projet hydroélectrique de la Romaine, par exemple maintient que :

« On ne peut pas établir clairement de stratégie d'adaptation sur la base de projections climatiques incertaines... » (2007, Vol. 7, Sec. 49, p.9).

Dans le même ordre d'idée, le rapport des sables bitumineux de Kearl fait valoir que :

« Il n'est pas possible de prévoir avec assurance les effets hydrologiques futurs causés par le changement ou la variabilité climatiques à temps pour les évaluations environnementales des impacts climatiques parce que le rapport entre les changements dans la température de l'air et précipitation et les changements dans les écoulements fluviaux de la région des sables bitumineux ne peut pas être établi en fonction des données à notre disposition. » (2007, Vol. 4, Annexe B, p. 47).

Étant donné la complexité du changement climatique et les difficultés à prédire le futur climat, les promoteurs de projets tendent à favoriser un supplément de recherche, la surveillance continue et l'adaptation comme étant les stratégies les plus pratiques.

Il nous faut donc trouver des méthodes pour sélectionner les scénarios et les stratégies d'adaptation puisque les promoteurs de projets ont une capacité très limitée à traiter convenablement du changement climatique. Il n'existe pas de lignes directrices claires indiquant quels scénarios les promoteurs de projets devraient prendre en considération ni de lignes directrices aidant les décideurs à utiliser ces informations pour déterminer la meilleure stratégie d'adaptation, surtout face aux incertitudes sur les scénarios.

6. Le processus de décision dans le contexte incertain du changement climatique : une analyse documentaire des méthodes

L'examen des EE canadiennes de la section précédente révèle que les promoteurs de projets prêtent de plus en plus attention au changement climatique du Canada. Ce mouvement est bénéfique, mais il est encore gêné par les méthodes non

systematiques. Le but principal de ce rapport consiste à guider les différents efforts vers une démarche plus structurée du processus de décision, en matière d'adaptation au changement climatique au niveau du projet. À cet effet, on a examiné la documentation pertinente à l'égard des méthodes du processus de décision confronté à l'incertitude sur le changement climatique. Dans la Section 7, on illustre les méthodes les plus prometteuses mises au point pour servir d'outils aux EE au niveau du projet.

La Convention – cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC 2008) et Feenstra *et al.* (1998) présentent un précis des conditions d'emploi ainsi que des outils et des méthodes du processus de décision et d'adaptation au changement climatique qui incluent l'analyse coût-avantage, l'analyse coût-efficacité (ACE), la matrice des décisions d'adaptation, les outils d'évaluation et de gestion environnementales, etc. L'analyse coût-avantage, par exemple, évalue les solutions en matière d'efficacité économique (ex. : le meilleur rendement d'équivalent monétaire pour un investissement financier donné). L'incertitude au sujet de l'avenir est intégrée dans l'analyse coût-avantage en augmentant le taux d'actualisation pour réduire la valeur actuelle de coûts et avantages futurs inconnus bien que ceci ne suffise pas à évaluer les solutions d'adaptation au changement climatique. Les méthodes aux attributs multiples, telles que celle des outils d'évaluation et de gestion environnementales, estiment une variété d'attributs et leur donnent une valeur selon les préférences. La CCNUCC (2008) présente ces outils d'une manière bibliographique normalisée, décrivant leur utilisation appropriée, leur portée, les données essentielles d'entrée et de sortie, la formation requise, les besoins en informatique, l'estimation des coûts d'application et les références d'ouvrages à consulter. Feenstra *et al.* (1998) évaluent les outils de la même façon en matière du niveau de précision, de capacité à traiter des incertitudes et des besoins en données d'entrées et en ressources. Ces outils traitent des incertitudes principalement dans le contexte des analyses de sensibilité appliquées aux valeurs supposées dans l'analyse (ex. : avantages, coûts, valeurs) au lieu de traiter explicitement et directement des incertitudes sur le climat futur. De nombreux auteurs, dont Bruin *et al.* (2009a, 2009b), Qin *et al.* (2008), Bell *et al.* (2001, 2003), Janssen (2001) et Steele *et al.* (2009) discutent de ces méthodes.

D'autres méthodologies ont été mises au point pouvant explicitement intégrer les incertitudes dans le processus de décision, peut-être conjuguées avec des méthodes telles que celle de l'analyse coût-avantage. On les classe selon la probabilité des scénarios de climats futurs. On discute, ci-dessous, de ces méthodes, chacune reflétant une attitude envers les risques et les incertitudes. Dans la mesure où l'incertitude sur le changement climatique possède les caractéristiques d'autres formes d'incertitude, les techniques générales du processus de décision en univers incertain ont le potentiel d'être utiles aux EE de projets.

6.1 Les méthodes utilisant les probabilités

Les méthodes de cette catégorie sont fondées sur l'analyste capable d'attribuer des valeurs de probabilité subjectives à des climats futurs différents. Si l'on considère trois

scénarios climatiques futurs, par exemple, le premier scénario perçu comme ayant une probabilité de 30 % et le second et le troisième, une probabilité de 10 % et 60 %, respectivement. Ces probabilités sont conjuguées avec les résultats du projet (coûts et avantages) en fonction des différents scénarios pour comparer les solutions possibles (ex. : les valeurs probables ou l'espérance d'utilité). L'une des méthodes, l'analyse bayésienne, met à jour les probabilités en fonction des nouvelles informations, ce qui en fait un outil de gestion adaptative.

Dessai et van der Sluijs (2007) suggèrent que l'analyse bayésienne est une méthode utile à l'analyse des incertitudes sur le changement climatique relatives aux systèmes d'infrastructures et au projet. L'un des avantages principaux dérive de la capacité de l'analyse bayésienne à estimer la valeur espérée de l'information exacte ou inexacte sur le changement climatique.

Hobbs (1997) procure un sommaire sensé sur la valeur et les difficultés d'emploi de l'analyse bayésienne pour améliorer le processus de décision face à l'incertitude sur le changement climatique. Il aborde les problèmes principaux d'inférence, d'évaluation subjective et de mise à jour de modèles intégrant les nouvelles informations. Il décrit aussi un cadre conceptuel fondé sur l'analyse bayésienne de Monte Carlo pour la mise à jour des modèles d'élévation du niveau des mers. Hobbs *et al.* (1997) appliquent des arbres de décision et des analyses bayésiennes pour évaluer la valeur d'intégrer l'incertitude sur le changement climatique aux décisions sur l'infrastructure des ressources hydriques ; ils appliquent spécialement cette démarche à un exemple de régulation de niveau d'eau et de digues pour protéger le rivage du lac Érié. Les auteurs remarquent qu'il est utile de tenir compte de l'incertitude sur le changement climatique pour protéger contre des pertes d'opportunités importantes ; de même que sont utilisées les options réelles dans une variété de contextes, les méthodologies du processus de décision sont utilisées dans le contexte du changement climatique, pour d'autres formes fréquentes d'incertitude présentes dans les projets d'ingénierie. Leur analyse procure aussi des estimations sur la valeur d'attendre qu'il y ait de meilleures informations sur le changement climatique avant de prendre une décision.

Comme l'explique Hobbs (1997), l'attitude du décideur envers le risque est aussi intégrée dans l'analyse bayésienne au moyen de fonctions d'utilité (Keeney et Raiffa, 1976).

6.2 Les méthodes sans probabilités

Cette catégorie s'applique quand il est impossible d'attribuer des probabilités aux différents climats futurs parce qu'il n'existe pas d'estimations subjectives raisonnables ou qu'elles ne font pas l'objet d'un accord. Elles comprennent les règles de décision classiques telles que le maximin et le regret minimax (Kassouf 1970; Lifson 1972) qui sont appliquées à une variété de contextes tels que celui de la planification des ressources hydriques (Maass *et al.* 1962). Plusieurs auteurs, dont Bretteville (1999), Clarke (2008) et Willows et Connell (2003) ont discuté de l'application de ces méthodes au processus de décision en univers incertain du changement climatique, tel que résumé ci-dessous.

Bretteville (1999) met en évidence les règles de décision classiques appliquées au changement climatique, au niveau des stratégies ; il offre un exemple simplifié, où l'on considère que le dommage dû au changement climatique, avec ou sans initiatives d'orientation est connu tout comme est connu le coût d'implantation de la stratégie. Une matrice de gain est créée à laquelle sont appliqués une variété de critères de décision (ex. : le maximin, le regret minimax, le gain escompté, etc.) à deux stratégies : l'une est fondée sur le principe de précaution et l'autre sur le principe de non-intervention. Trois scénarios sont pris en considération : le changement climatique cause des dommages insignifiants, le changement climatique cause des dommages alors que la stratégie est efficace et le changement climatique cause des dommages alors que la stratégie n'est pas efficace. Bretteville indique que la sélection de la meilleure stratégie dépend du choix des critères de décision, de l'ampleur des coûts et de la formulation de la question d'incertitude. L'étude traite aussi de la distinction entre le risque et l'incertitude ; le risque implique une connaissance de la probabilité de l'événement alors que l'incertitude indique une incapacité à attribuer des valeurs significatives de probabilité. Les méthodes fondées sur l'espérance d'utilité sont appropriées quand les probabilités et les résultats sont raisonnablement connus. Puisque ce n'est pas le cas du changement climatique, Bretteville en a conclu que les critères de décision probabilistes étaient par conséquent mieux adaptés.

Willows et Connell (2003) donnent un exemple hypothétique simple d'utilisation des règles de décision (maximax, minimax et regret minimax) pour l'adaptation au changement climatique. Dans cet exemple, ils créent une matrice des gains basée sur le changement climatique qui finit par se produire (changement rapide, peu de changement et pas de changement) et sur l'investissement en adaptation (aucun, faible, moyen et important).

Clarke (2008) applique les règles d'aide à la décision pour évaluer l'efficacité des stratégies d' « assurance sociale » qui minimisent le regret et les résultats dans le pire des cas (le principe de précaution) et il évalue le rôle des stratégies « sans égard aux conditions météorologiques » et des stratégies mixtes. Il tient spécialement compte du rôle des coûts potentiellement hauts d'élaboration et d'implantation de la stratégie, d'une stratégie inefficace, des coûts liés au changement climatique qui sont inférieurs à ceux qui avaient été prévus et des opportunités de coûts et de rendements provenant des initiatives stratégiques qui sont indépendantes du scénario climatique final. La gestion adaptative y est caractérisée par un exemple de stratégie liée au bassin fluvial ayant deux attributs (des données agricoles et la biodiversité) ; la stratégie incorpore les règles classiques à la théorie de l'utilité afin de créer une matrice des gains dont les valeurs dérivent d'une fonction de bien-être collectif fondé sur ces deux attributs.

6.3 La gestion adaptative et le concept de souplesse

Telle que décrite ci-dessus (Section 4), la gestion adaptative est une méthode générale qui répond aux incertitudes sur le changement climatique en retardant certaines décisions. On compare les solutions de la gestion adaptative aux solutions non adaptatives à l'aide de ces méthodes ayant ou non les probabilités décrites ci-

dessus. À l'égard du changement climatique, la documentation sur le processus de décision de la gestion adaptative s'est concentrée sur l'analyse bayésienne (Hobbs 1997; Hobbs *et al.* 1997), telle que décrite ci-dessus. Plus récemment, Yang *et al.* (2008) ont créé une méthode mathématique sophistiquée par les options réelles pour examiner soigneusement les décisions d'investissement en production d'énergie électrique face à l'incertitude réglementaire en matière du prix des émissions de carbone. On part du principe que la réglementation de plusieurs champs d'application est encore en évolution, mais qu'inévitablement, elle affectera directement ou indirectement, le prix des émissions de carbone ; une telle incertitude sur le prix des émissions affecte la sélection de la technologie de production d'énergie, les coûts d'exploitation des installations et les décisions de financement par les investisseurs. L'option réelle est liée à la souplesse dont jouissent les compagnies à synchroniser leurs investissements face à l'incertitude réglementaire et à exploiter une approche attentiste. Pour mieux évaluer la valeur de l'attente, les auteurs emploient un modèle de programmation dynamique qui compare la valeur espérée d'un investissement initial avec celle d'un investissement retardé jusqu'au moment propice.

6.4 Les conclusions de l'analyse documentaire

La plupart des méthodes normalisées d'évaluation des options de projets, telles que l'analyse coût-avantage et l'analyse des attributs multiples, souffrent de leur incapacité à traiter suffisamment des incertitudes inhérentes au changement climatique. Cette section s'est par conséquent concentrée sur les règles classiques d'aide à la décision en univers incertain et sur l'analyse bayésienne pour les risques. Bien qu'il existe une documentation importante sur ces méthodes, celle-ci n'a été que partiellement appliquée au changement climatique et ne présente principalement que des exemples et des explications limités. La prochaine section décrit les techniques les plus prometteuses au moyen d'exemples.

7. Les modèles de décision au niveau du projet pour les EE

Cette section développe l'application de modèles de décision à l'évaluation des mesures d'adaptation en présence d'incertitudes sur le changement climatique. Les modèles sont illustrés par un exemple hypothétique de projet hydroélectrique. La gestion adaptative est apportée au cadre conceptuel de ces modèles de décision. Ces méthodes sont initialement utilisées avec des problèmes ne comportant qu'un attribut et puis sont étendues à des problèmes comportant deux attributs.

7.1 L'application des règles de décision en univers incertain

Dans un rapport de recherche destiné à l'Agence, Byer *et al.* (2004) présentent des méthodes que les praticiens des EE peuvent employer pour estimer les effets du changement climatique sur un projet ayant des scénarios futurs différents. Sélectionner les scénarios adaptés n'est pas évident. Le GIEC (2001) recommande que : « les utilisateurs...appliquent de multiples scénarios...recouvrant une gamme de climats futurs possibles plutôt que ne concevoir et n'appliquer qu'une seule supposition comme étant la meilleure. » L'Institut canadien d'études climatologiques

recommande de : « sélectionner des scénarios spécifiques représentant les extrêmes des variables essentielles requises pour l'analyse ainsi qu'un scénario intermédiaire plus modéré » (CICS 2003). Les variables climatiques pertinentes, telles que les précipitations, dépendent à la fois du type de projet et des effets préoccupants. Des « archétypes » de scénarios sont mis au point pour procurer des informations adaptées aux besoins de secteurs et de types de projets spécifiques. Le Réseau canadien de scénarios de changements climatiques (RCSCC) procure des informations de scénarios pour le processus de décision et l'élaboration de stratégies qui incluent des modèles de création de scénarios et d'études de phénomènes de sous-échelle. Les scénarios proviennent de nombreux centres de recherche internationaux, de même que les résultats du Modèle régional canadien du climat (MRCC 2010).

En supposant qu'il est possible de créer des scénarios appropriés et d'en estimer les effets pour différents concepts, on applique alors une variété de modèles de décisions. La sélection des concepts d'un projet pour des scénarios établis auxquels ne sont pas associés de probabilités connues constitue le processus de décision en *univers incertain*. Quand certaines probabilités subjectives (dérivées, par exemple, d'une simulation Monte Carlo ou de l'opinion d'un expert) sont attribuées à un scénario, le processus de décision est dans un *univers à risques*.

En établissant le cadre conceptuel du processus de décision, les différentes options de concepts sont mises en correspondance avec les différents scénarios. Dans le cas de l'installation hydroélectrique, par exemple, les options de concepts consistent de capacités de réservoir différentes adaptées à des scénarios d'écoulements fluviaux différents. Dans le cas de l'oléoduc subarctique, les différentes options de concepts consistent de tuyaux ayant des caractéristiques de support et d'assise différents (comme la quantité d'isolation par exemple) qui reflètent les degrés différents de gravité du réchauffement climatique (correspondant à des besoins différents de protection du pergélisol déjà fragile). Le scénario qui nous intéresse (ex. : le degré du dégel) ne se matérialise et ne devient apparent qu'à l'avenir, après que les décisions essentielles sont prises et il est donc possible que le concept du projet puisse, à un certain moment, ne plus être adapté au scénario définitif (et puisse, en rétrospective, être regretté).

L'application des règles classiques de décision est illustrée par un exemple de projet hydroélectrique hypothétique ayant cinq options de concepts et trois scénarios climatiques potentiels pour lesquels les probabilités n'ont pas été estimées. À des fins d'illustration, les exemples débutent avec des hypothèses simplifiées (et non réalistes). Ces exemples sont progressivement développés avec des facteurs plus compliqués, mais aussi plus réalistes. On prévoit que le projet dure au moins 60 ans. Le tableau 7.1 indique les coûts initiaux du projet et le net gain financier global (en termes de valeurs⁵ actuelles en millions de dollars) pour chaque combinaison de scénarios et d'options de concepts. Le coût de chaque option de concepts (25, 40, 62,

⁵ La valeur actualisée nette (VAN) est obtenue à l'aide des méthodes économiques normalisées qui convertissent les montants futurs en les actualisant aux valeurs actuelles.

51 et 68) est le même pour chaque scénario. Les avantages (ex. : les revenus du projet) pourraient être déterminés faisant correspondre les résultats de l'analyse des scénarios à ceux des bassins hydrographiques récepteurs et les modèles d'installations hydrauliques pour être en mesure d'évaluer la production énergétique. Les options de concepts représentent des capacités différentes composant avec les écoulements fluviaux qui correspondent aux différents climats (1 étant le climat actuel, 2 représentant un changement modéré de l'écoulement fluvial et 3 étant la déviation extrême du climat actuel). Dans cet exemple, les rendements sont financiers, mais les modèles de décision pourraient aussi bien s'appliquer à un autre paramètre unique qui intéresse les praticiens des EE. Il pourrait s'agir, par exemple, de l'estimation du nombre d'hectares de terre arable affectée par un projet, de la probabilité des inondations, de la perturbation de la faune, etc.

Tableau 7.1 Les coûts du projet et le net gain financier global incluant les coûts initiaux

		Coûts initiaux (millions de \$)			Net gain financier (millions de \$)			
		Scénario climatique			Scénario climatique			
Options de concept		1	2	3	Options de concept	1	2	3
A		25	25	25	A	45	55	55
B		40	40	40	B	36	80	100
C		62	62	62	C	18	68	138
D		51	51	51	D	33	77	95
E		68	68	68	E	12	72	104

Si l'on savait quel scénario allait se produire, on saurait quel concept choisir. Si l'on savait, par exemple, que le scénario 2 allait se produire, le concept B serait sélectionné parce qu'il a le meilleur net gain financier global (80 comparé à 55, 68, 77 et 72). Si le scénario 1 se produisait, on choisirait le concept A parce qu'il a la plus grande valeur (45) et si c'était le scénario 3, on choisirait le concept C qui a une valeur de 138. Cependant, on ne sait pas, au moment de prendre la décision, quel scénario se produira et c'est pourquoi on applique une variété de méthodes d'aide à la décision qui nous aide à prendre la décision.

La première étape, quand on applique l'une de ces méthodes, consiste à éliminer les options de concepts qui sont dominées par d'autres solutions possibles. Une solution est dominée par une autre solution si, pour chacun des scénarios possibles, cette autre solution offre un gain égal ou supérieur. Ainsi, le concept D peut être abandonné tout de suite parce qu'il est dominé par le concept B (pour le scénario 1, 36 > 33; pour le scénario 2, 80 > 77; pour le scénario 3, 100 > 95). Les solutions dominées ne sont

pas toujours apparentes (et ne sont pas toujours présentes dans la sélection); cependant, quand elles existent, le fait de les éliminer simplifie l'espace de décision.

Il faut aussi éliminer les solutions qui ne répondent pas aux contraintes de faisabilité ni aux seuils acceptables. Si le projet, par exemple, doit réaliser un net gain financier d'au moins 15, il faut abandonner le concept E. Les contraintes existent pour une variété de critères et dépendent du degré d'acceptation juridique, économique, environnementale et sociale. On devrait, cependant, n'utiliser que les contraintes obligatoires pour ne pas abandonner les solutions prometteuses prématurément.

Il reste donc trois options de conception (ex. : conceptions A, B et C) auxquelles sont alors appliqués une variété de critères classiques de décision en vertu de l'attitude du décideur envers les incertitudes.

Le critère maximin

Un décideur ayant une aversion au risque agit prudemment en tenant plus spécialement compte des pires résultats possible. Dans le cas extrême, le décideur sélectionne la solution ayant les pires résultats (ex. : celle qui maximise le gain minimum dérivant des options de concepts). C'est pourquoi il est appelé maximin ; ce critère étant essentiellement perçu comme pessimiste. Dans cet exemple (Tableau 7.2), les pires résultats sont 45 pour le concept A, 36 pour le concept B et 18 pour le concept C. On choisira donc le concept A selon ce critère puisque 45 est le plus élevé de ces gains. Le concept A est l'option la plus prudente, d'un point de vue économique, parce qu'elle coûte le moins cher et ne court pas le risque d'obtenir des revenus futurs qui ne se matérialiseront peut-être pas.

Tableau 7.2 Le critère pessimiste maximin

Options de concept	Net gain financier (millions de \$)		
	Scénario climatique		
	1	2	3
A	45	55	55
B	36	80	100
C	18	68	138

Maximin

Le critère maximax

Le critère opposé du maximin est le maximax qui est enclin à prendre des risques (optimiste). Dans un tel cas, le décideur se concentre sur les meilleurs résultats. L'option préférée est celle qui maximise les gains maximums de chaque option, d'où

le nom maximax. Tel qu'indiqué au tableau 7.3, les gains maximum des concepts A, B et C sont 55, 100 et 138, respectivement. Il faut donc choisir le concept C. Ce critère ne reflète pas, cependant, la démarche prudente qui est généralement envisagée en matière de changement climatique.

Tableau 7.3 Le critère optimiste maximax

Options de concept	Net gain financier (millions de \$)		
	Scénarios climatiques		
	1	2	3
A	45	55	55
B	36	80	100
C	18	68	138

Maximax

Le critère du regret minimax

La démarche prudente du critère du regret minimax consiste à chercher à minimiser le risque d'être déçu après le fait ou la tendance à dire : « si seulement j'avais choisi la solution X, je serais avantagé du montant Y. » Cette méthode exige d'abord de créer une matrice des regrets telle que montrée à droite du tableau 7.4. On évalue les éléments de cette matrice en déterminant d'abord le gain le plus élevé correspondant à chaque scénario et puis on soustrait les gains de chaque concept (correspondant à ce scénario) au gain le plus élevé. Par exemple, si le scénario 2 se réalise et que le concept B avait été choisi, il n'y aurait aucun regret ($80 - 80 = 0$). Mais, si on avait choisi le concept A, alors le projet aurait un rendement plus faible de 25 unités ($80 - 55 = 25$).

Tableau 7.4 Le critère du regret minimax

Options de concept	Net gain financier (millions de \$)			Options de concept	Matrice des regrets		
	Scénario climatique				Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	45	55	55	A	0	25	83
B	36	80	100	B	9	0	38
C	18	68	138	C	27	12	0

Regret minimax

Chaque option de concept a le potentiel d'entraîner un certain regret. Le but de créer une matrice des regrets est d'indiquer au décideur quels rendements seraient abandonnés si l'on ne choisissait pas le meilleur concept correspondant à un scénario donné.

Le critère du regret minimax permet au décideur de choisir le concept qui minimise le regret maximum. Le regret maximum serait de 83 si l'on choisissait le concept A. Il serait de 38 pour le concept B et de 27 pour le concept C.

Le critère de Hurwicz en fonction d'alpha

Les règles d'aide à la décision discutées ci-dessus supposent des attitudes soit très optimistes soit très pessimistes envers une incertitude. Un décideur n'a pas forcément cette attitude extrême. Le critère Hurwicz en fonction d'alpha est un compromis entre les deux critères précédents d'optimisme et de pessimisme. α est un coefficient allant de 0 à 1 qui représente le degré de pessimisme du décideur (si $\alpha = 1$, la démarche est réduite au critère maximin et si $\alpha = 0$, elle devient le critère maximax). On l'utilise pour calculer ce qui est appelé la valeur de Hurwicz, H , pour chaque solution :

$$H = \alpha \times \text{rentabilité minimum} + (1 - \alpha) \times \text{rentabilité maximum}$$

Pour cet exemple, le tableau 7.5 indique le rendement minimum et maximum de chaque concept.

Tableau 7.5 Le critère de Hurwicz en fonction d'alpha

Options de concept	Net gain financier (millions de \$)		
	Scénario climatique		
	1	2	3
A	45	55	55
B	36	80	100
C	18	68	138

Si, par exemple, le décideur a une tendance pessimiste ayant une valeur correspondante de $\alpha = 0,7$, la valeur de Hurwicz pour chacun des concepts est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Concept A : } H &= \alpha 45 + (1 - \alpha)55 = 0,7(45) + (1 - 0,7)55 = 48,0 \\ \text{Concept B : } H &= \alpha 36 + (1 - \alpha)100 = 0,7(36) + (1 - 0,7)100 = 55,2 \\ \text{Concept C : } H &= \alpha 18 + (1 - \alpha)138 = 0,7(18) + (1 - 0,7)138 = 54,0 \end{aligned}$$

Le concept B serait l'option choisie parce qu'elle possède la *valeur de Hurwicz maximum*.

Autres types de rentabilité

On a discuté de ces critères avec un exemple ayant des effets quantitatifs (ex. : dollars) qui sont désirés en grande quantité. Il est possible d'adapter ces critères à des effets néfastes tels que la perturbation de la faune. Dans ces cas-là, le critère maximin devient le critère minimax et le critère maximax devient le critère minimin. Le critère du regret minimax demeure le même, mais la matrice des regrets est fondée sur le rendement le plus faible dans chaque scénario. On peut aussi appliquer ces critères aux effets qui ne sont pas quantitatifs dans la mesure où il est possible de classer les effets par ordre de préférence. Si, par exemple, on mesure la perturbation de la faune selon une échelle qualitative telle que de « très faible » à « très élevée » comme indiqué au tableau 7.6, le critère minimax identifie les effets maximum des concepts A, B et C comme « très élevée », « modérée » ou « élevée », respectivement. On choisirait le concept B puisque le maximum d'entre toutes les perturbations est « modérée ». Les descriptifs qualitatifs peuvent être plus compliqués qu'indiqué ici et peuvent même se constituer de clauses et de phrases. Il est aussi possible de créer une matrice des regrets à partir de mesures qualitatives.

Tableau 7.6 Les effets de perturbation de la faune

Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3
A	Modérée	Faible à très faible	Très élevée
B	Faible	Modérée	Modérée
C	Très faible	Élevée	Faible

Minimax

7.2 Les méthodes avec probabilités

Les critères mentionnés ci-dessus sont appliqués sans aucune estimation ou supposition concernant la vraisemblance ou les probabilités des trois scénarios. L'un des modèles de décision classiques (le critère Laplace) applique une probabilité égale à chacun des états inconnus (ex. : les scénarios climatiques futurs) quand il n'existe aucune information suggérant qu'un état est plus ou moins probable que les autres. Cependant, bien que le changement climatique soit encore très incertain, les experts sont à présent capables de fournir quelques informations sur les scénarios qui sont

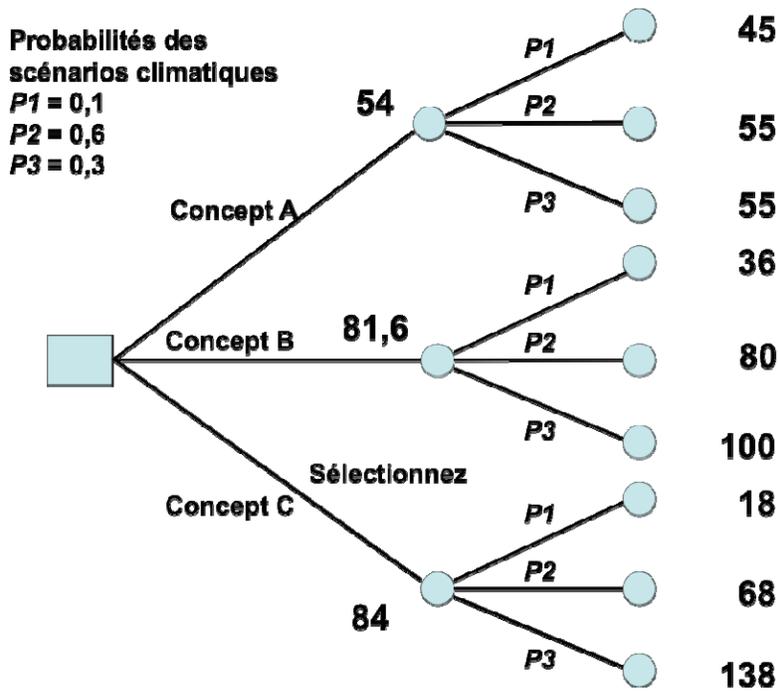
plus vraisemblables que d'autres. Si le décideur possède des informations concernant la vraisemblance relative des scénarios ou s'il est à l'aise de les supposer, on peut attribuer des probabilités subjectives à chaque scénario et adopter une démarche en fonction des risques. On peut établir des probabilités subjectives au moyen de conseils d'experts ou par la modélisation. Dans l'exemple de la production d'énergie hydroélectrique, on peut rechercher des estimations sur la relative vraisemblance de plusieurs ensembles de variables climatiques. Ces estimations pourraient, par exemple, produire les probabilités 0,1, 0,6 et 0,3 pour les scénarios 1, 2 et 3, respectivement.

Deux critères de décision basés sur les probabilités sont la valeur espérée et l'espérance d'utilité. Selon le critère de la valeur espérée, le rendement espéré de chaque option de concept est calculé comme étant la somme des rendements pondérée par les probabilités des scénarios. Le concept préféré est celui qui possède le rendement espéré le plus élevé ou le plus faible selon si le rendement est désirable ou indésirable, respectivement. Le processus de décision en fonction des risques est souvent décrit sous la forme d'un arbre de décision tel qu'à la figure 7.1, par exemple. Le rendement espéré du concept B est le suivant : $(0,1)36 + (0,6)80 + (0,3)100 = 81,6$. De même, les valeurs espérées ainsi calculées des concepts A et C sont de 54,0 et 84,0, respectivement. C'est le concept C qui devrait être choisi parce qu'il a la valeur la plus élevée. C'est un choix logique ayant 90 % de chance de produire un rendement relativement élevé.

Le critère de la valeur espérée est approprié pour les décideurs qui sont neutres par rapport au risque (ex. : ils ne sont ni enclins ni averses au risque). Pour intégrer une attitude différente envers le risque (ex. : qui n'est pas neutre), on utilise le critère de l'espérance d'utilité où la fonction d'utilité modifie les rendements selon le degré d'aversion au risque (Hobbs, 1997; Keeney et Raiffa, 1976). Pour les évaluations environnementales, le fait d'évaluer une fonction d'utilité, de l'interpréter et d'en présenter les résultats présente des difficultés pratiques importantes.

Une autre méthode basée sur le risque consiste à identifier le scénario le plus vraisemblable et de prendre une décision en fonction de la matérialisation de ce scénario. Dans l'exemple, le scénario 2 est le plus vraisemblable des trois scénarios ; selon ce scénario, le concept B a le rendement le plus élevé et serait donc choisi. Cette méthode fait abstraction des effets associés aux autres scénarios qui ont pourtant une chance raisonnable de se produire. Cette méthode ne devrait être utilisée que quand la vraisemblance des autres scénarios est relativement faible et que leurs effets sont acceptables s'ils se produisent. On ne discutera pas plus longuement de cette méthode ici puisque l'étude n'est pas orientée sur ces cas.

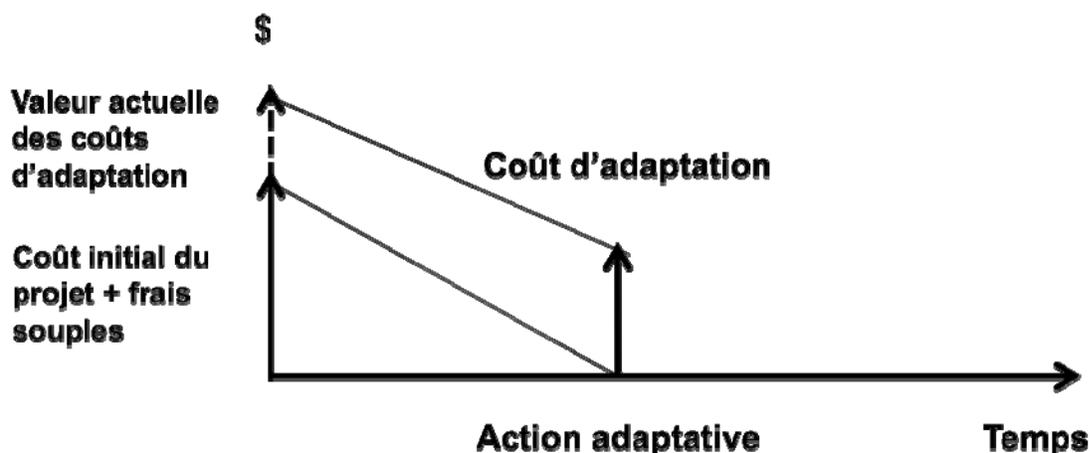
Figure 7.1 L'arbre de décision pour l'exemple de la valeur espérée



7.3 La gestion adaptative et le rôle de la souplesse

Une démarche intéressante quand on traite de l'avenir incertain est celle de l'« attentisme ». Il s'agit principalement d'attendre de recevoir de plus amples informations alors que la trajectoire du climat devient de plus en plus apparente. La gestion adaptative décrite à la section 4.5 requiert un coût initial pour « acheter » la souplesse permettant l'adaptation des actions futures au changement climatique. Il s'agit, par essence, de payer pour réduire l'incertitude. Ceci est illustré par la figure 7.2 où le temps est représenté par l'axe horizontal avec un projet initial suivi, à un moment donné dans l'avenir, d'une action adaptative potentielle. L'axe vertical représente les coûts ; il indique le coût initial du projet (incluant les frais induits par la souplesse) ainsi que les coûts d'adaptation futurs.

Figure 7.2 Les mouvements de trésorerie et les valeurs actuelles d'une construction en phases



Dans cet exemple, la gestion adaptative réfère au concept actuel d'une capacité plus petite (concept A pour le scénario 1 du climat actuel) puis à l'expansion tardive (censée être dans 10 ans à des fins d'illustration dans nos exemples⁶) d'une capacité plus importante (concept B ou C) selon le changement climatique. Il existe trois avenir possibles : le climat ne subit aucun changement (scénario 1), le climat change du scénario 1 au scénario 2 et se stabilise au scénario 2 ou bien le climat change du scénario 1 au scénario 3 et se stabilise au scénario 3.

Si le climat varie du scénario 1 au scénario 2, on peut alors modifier le projet en adoptant le concept B (l'action adaptative) de façon à réaliser des revenus plus importants. Ceci est possible à cause des frais initiaux de souplesse qui reflètent les coûts additionnels associés à un concept plus sophistiqué ayant permis l'expansion. Ils incluent aussi les dépenses d'équipement de surveillance continue qui facilitent la démarche attentiste consistant à observer et à enregistrer les données qui permettent aux décideurs d'évaluer la trajectoire climatique. L'avantage de cette méthode est d'éviter les coûts additionnels inutiles pour des concepts initiaux qui risquent de n'être jamais utilisés. Un autre avantage est de retarder certaines dépenses.

La gestion adaptative offre de nouvelles options de concepts au moyen de la souplesse de décision. Le concept A, par exemple, ayant une capacité d'expansion future (souplesse) constitue une nouvelle option (concept F) qui est évaluée contre d'autres options selon les critères discutés antérieurement. Le tableau 7.7 présente cette option ainsi que les concepts A et B pour les scénarios 1 et 2. On a temporairement omis le concept C et le scénario 3 pour simplifier la discussion. La matrice de gauche du tableau 7.7 indique les coûts initiaux de chaque concept.

⁶ Dix ans est relativement court comparés au temps que prennent certains scénarios climatiques à diverger. Les décideurs ont cependant suffisamment de preuves du changement climatique bien antérieurement à cette divergence pour être en mesure de juger si une action adaptative est requise. La période de dix ans n'est qu'à des fins d'illustration et les analystes peuvent utiliser des analyses de sensibilité pour évaluer les effets à différentes périodes.

Comme auparavant, les coûts pour A et B sont les mêmes pour chaque scénario. Les coûts initiaux du concept F est le coût du concept A plus les frais de souplesse, X, permettant l'expansion du concept B.

D'autres coûts et avantages sont indiqués à droite de la matrice du tableau 7.7. Ils se comprennent des avantages nets annuels (revenus annuels provenant de la production d'électricité moins les coûts d'exploitation) et, dans le cas du concept F, des frais d'expansion pour modifier la capacité selon le scénario 2. Au scénario 1, le climat ne change pas et l'équivalent des avantages nets annuels (3,5 pour le concept A, 3,8 pour le concept B et 3,5 pour le concept F parce qu'il est le même que A) demeure constant, à l'avenir. Pour simplifier, tout le changement dans le climat du scénario 2 se produit en 10 ans ; par conséquent, les avantages nets annuels du concept A sont de 3,5 pour la première période de 10 ans et augmentent à 4,0 après la réalisation du scénario 2. De même en ce qui concerne le concept B, les avantages nets annuels sont de 3,8 pour la première période de 10 ans et augmentent à 6,0 après la réalisation du scénario 2. Le concept F possède les avantages du concept A dans la première période de 10 ans et puis reçoit les avantages du concept B après la 10^e année à cause de son expansion au concept B. De plus, le concept F engage un coût ponctuel de 15 pour l'expansion de la 10^e année⁷.

Tableau 7.7 Coûts et avantages selon une stratégie adaptative

Options de concept	Coûts initiaux		Options de concept	Coûts futurs et avantages annuels	
	Scénario climatique			Scénario climatique	
	1	2		1	2
A	25	25	A	3,5	3,5 de 0 à 10 ans 4,0 dans 11+ ans
B	40	40	B	3,8	3,8 de 0 à 10 ans 6,0 dans 11+ ans
F	(25 + X)	(25 + X)	F	3,5	3,5 de 0 à 10 ans 6,0 dans 11+ ans -15 dans 10 ans

Les nets gains financiers (de la VAN)⁸ des options de concepts pour les scénarios climatiques pertinents sont résumés au tableau 7.8 ; X étant le coût initial de la souplesse de la gestion adaptative.

⁷ Le coût marginal de 15, qui est la différence entre les coûts initiaux des concepts A et B pourrait être supérieur dû à la perte des économies d'échelle.

⁸ Ces valeurs sont obtenues à l'aide de méthodes économiques normalisées qui convertissent les montants futurs en valeurs actualisées (on suppose 5 %/an dans ces calculs). Puisque les revenus annuels du scénario 2 demeurent les mêmes que ceux du scénario 1 jusqu'à l'année 10 de transition, la VAN des concepts A et B est inférieure à celle des tableaux précédents (ex. : 50 au lieu de 55 et 61 au lieu de 80). L'annexe 2 de la section 9.2 explique ces calculs plus en détails.

Tableau 7.8 Net gain financier des options de concept avec souplesse

		Scénario climatique	
		1	2
Options de concept	A	45	50
	B	36	61
	F	45 - X	65 - X

Le tableau 7.9 indique les matrices des rendements et des regrets ayant des frais souples de 5 ($X = 5$). Selon le critère maximin, le concept A est l'option préférée. Un décideur ayant une grande aversion au risque ne préférera jamais le concept F au concept A parce qu'elle exige des coûts initiaux plus élevés et risque de ne pas réaliser des avantages futurs plus élevés (parce que le scénario 2 risque de ne pas se produire). Le concept F est cependant le concept préféré selon le regret minimax. Avec le concept A, le regret maximum potentiel est de 11 ; avec B, il est de 9 et avec F, il est de 5 qui correspond aux frais souples de X. La capacité du concept A est mise en correspondance avec le scénario 1 et si le scénario 2 se produit à sa place, le projet ne peut pas réaliser les avantages supérieurs qui se seraient produits. Le concept B est basé sur le scénario 2 et, s'il ne se produit pas, la dépense initiale additionnelle effectuée pour étendre la capacité sera gaspillée. Le concept F minimise le regret parce que la capacité est mise en correspondance avec le scénario qui se matérialise; il paie pour les coûts de capacité seulement si ces derniers sont requis, mais les frais souples seraient regrettés si le scénario 2 ne se produisait pas et si la souplesse n'était pas nécessaire.

Tableau 7.9 Les matrices des nets gains financiers et des regrets pour les deux concepts et une souplesse de $X = 5$

Net gain financier (millions de \$)			Matrice des regrets		
	Scénario climatique		Options de concept	Scénario climatique	
	1	2		1	2
A	45	50	A	0	11
B	36	61	B	9	0
F	40	60	F	5	1

Maximin
Regret minimax

Ceci peut aussi se comparer à l'aide du critère de Hurwicz en fonction d' α . Si $\alpha = 0,7$, les valeurs de Hurwicz peuvent être déterminées pour chaque concept :

$$\text{Concept A : } H = \alpha 45 + (1 - \alpha)50 = 0,7(45) + (1 - 0,7)50 = 46,5$$

$$\text{Concept B : } H = \alpha 36 + (1 - \alpha)61 = 0,7(36) + (1 - 0,7)61 = 43,5$$

$$\text{Concept F : } H = \alpha 40 + (1 - \alpha)60 = 0,7(40) + (1 - 0,7)60 = 46,0$$

Le concept A ayant la valeur de Hurwicz maximum, il serait l'option préférée bien qu'il soit essentiellement lié au concept F.

On utilise aussi ces analyses pour déterminer le prix le plus élevé acceptable de la souplesse de décision. Si les frais souples sont de zéro, on opte pour le concept F. Le concept préféré passe à une stratégie non adaptative (A ou B) au fur et à mesure que les frais souples augmentent. Le point auquel on alterne dépend du critère. Si les frais souples sont supérieurs à zéro, on opte pour le concept A avec le critère maximin. Avec un critère de regret minimax, si $X = 10$ par exemple, le concept préféré est B tel qu'indiqué au tableau 7.10.

Tableau 7.10 Matrices des nets gains financiers et des regrets pour les deux concepts et une souplesse de $X = 10$

Net gain financier (millions de \$)			Matrice des regrets		
Scénario climatique			Scénario climatique		
	1	2	Options de concept	1	2
A	45	50	A	0	11
B	36	61	B	9	0
F	35	55	F	10	6
	Maximin	Maximax		Regret minimax	

Le point d'alternance (moment précis du changement) correspond, en fonction du critère du regret minimax, à des frais de $X = 9$. Tous frais souples supérieurs à 9 font passer du concept F au concept B. Le regret maximum (11) associé au concept A est le revenu abandonné si le scénario 2 se produit ; il est supérieur au regret maximum (9) associé au concept B qui correspond au coût de la capacité inutilisée si le scénario 2 ne se produit pas. De même, le regret maximum du concept F correspond à la souplesse inutilisée si le scénario 2 ne se produit pas et, on optera pour le concept B si le regret est supérieur à 9. À l'annexe 3, on présente une version généralisée, des matrices des regrets des tableaux 7.9 et 7.10 ayant X comme variable (Section 9.3).

La discussion au sujet de la gestion adaptative ci-dessus a été simplifiée en supposant seulement deux scénarios et trois concepts qui leur sont reliés. Cependant, tout processus de décision en matière de changement climatique futur devrait consister d'au moins trois scénarios (comme dans les exemples précédents) : avec peu ou aucun changement, avec un changement modéré et avec un changement important. On développe maintenant la discussion antérieure en réintroduisant les concepts et les scénarios initiaux. Le tableau 7.11 qui est semblable au tableau 7.7 indique les coûts initiaux et les coûts futurs ainsi que les avantages annuels dans le cas des quatre concepts et des trois scénarios. La stratégie de la gestion adaptative (concept F) correspond au concept A avec une souplesse dans la décision. À la dixième année, on étend le concept B (à un coût de 15) si le scénario 2 se produit ou on étend le concept C (à un coût de 37) si le scénario 3 se produit.

Tableau 7.11 Les coûts et avantages des trois concepts et de la souplesse

Options de concept	Coûts initiaux			Options de concept	Coûts futurs et avantages annuels		
	Scénario climatique				Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	25	25	25	A	3,5	3,5 de 0 à 10 ans 4,0 pour 11+ ans	3,5 de 0 à 10 ans 4,0 pour 11+ ans
B	40	40	40	B	3,8	3,8 de 0 à 10 ans 6,0 pour 11+ ans	3,8 de 0 à 10 ans 7,0 pour 11+ ans
C	62	62	62	C	4,0	4,0 de 0 à 10 ans 6,5 pour 11+ ans	4,0 de 0 à 10 ans 10,0 pour 11+ ans
F	(25 + X)	(25 + X)	(25 + X)	F	3,5	3,5 de 0 à 10 ans 6,0 pour 11+ ans -15 dans 10 ans	3,5 de 0 à 10 ans 10,0 pour 11+ ans -37 dans 10 ans

Les nets gains financiers produits sont indiqués au tableau 7.12 qui est semblable au tableau 7.8.

Tableau 7.12 Net gain financier pour trois concepts et les frais souples de X

Options de concept	Net gain financier (millions de \$)		
	Scénario climatique		
	1	2	3
A	45	50	50
B	36	61	73
C	18	47	89
F	45 - X	65 - X	100 - X

Les matrices des nets gains financiers et des regrets ayant des frais souples de 5 (X = 5) sont illustrées au tableau 7.13.

Tableau 7.13 Les matrices des nets gains financiers et des regrets pour trois concepts et des frais souples peu élevés ($X = 5$)

		Net gain financier					Matrice des regrets		
		Scénario climatique					Scénario climatique		
Options de concept		1	2	3	Options de concept		1	2	3
	A	45	50	50		A	0	11	45
B	36	61	73	B	9	0	22		
C	18	47	89	C	27	14	6		
F	40	60	95	F	5	1	0		
	Maximin					Regret minimax			

Le critère maximin opte pour le concept A et le regret minimax opte pour le concept F. Ces résultats sont les mêmes que ceux observés dans le cas des deux scénarios.

Comme auparavant, si $\alpha = 0,7$, les valeurs de Hurwicz sont déterminées pour chaque concept comme suit :

$$\text{Concept A : } H = \alpha 45 + (1 - \alpha)50 = 0,7(45) + (1 - 0,7)50 = 46,5$$

$$\text{Concept B : } H = \alpha 36 + (1 - \alpha)73 = 0,7(36) + (1 - 0,7)73 = 47,1$$

$$\text{Concept C : } H = \alpha 18 + (1 - \alpha)89 = 0,7(18) + (1 - 0,7)89 = 39,3$$

$$\text{Concept F : } H = \alpha 40 + (1 - \alpha)95 = 0,7(40) + (1 - 0,7)95 = 56,5$$

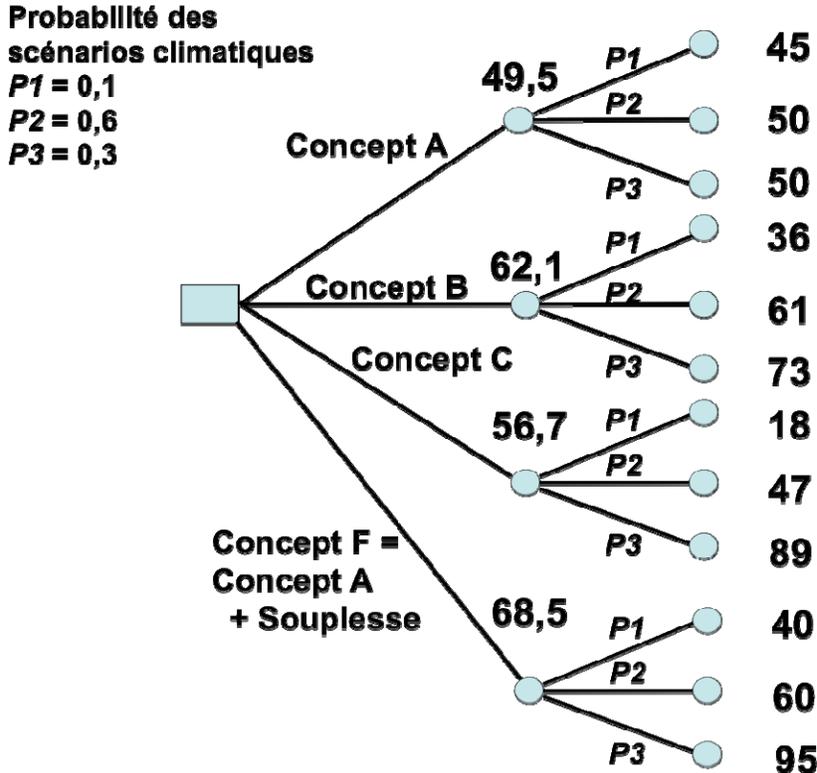
Puisque le concept F a la valeur de Hurwicz maximum, c'est l'option préférée. Dans le cas aux deux scénarios, le concept préféré est essentiellement à parité entre les concepts A et F. L'amélioration relative du concept F dans le cas aux trois scénarios reflète son potentiel à réaliser des gains importants si le scénario 3 se produit.

Comme dans le schéma des deux scénarios (tableaux 7.9 et 7.10), une hausse des frais souples dans cet exemple, fait passer à un autre concept préféré à un moment donné.

7.4 L'analyse avec les probabilités et la gestion adaptative

Comme dans la section 7.2, les valeurs espérées sont calculées pour une sélection de concepts (y compris les concepts adaptatifs) si on est en mesure d'estimer les probabilités pour chacun des scénarios. L'arbre de décision pour ce problème est illustré à la figure 7.3.

Figure 7.3 L'arbre de décision pour les trois concepts et la souplesse



Selon ces probabilités, la valeur espérée la plus élevée est de 68,5. Le concept F est donc le concept préféré et le concept B se classe en second. La probabilité du scénario 2 est beaucoup plus élevée que les probabilités des autres scénarios, ce qui favorise le concept B correspondant au scénario 2 ; cependant, le concept F a un meilleur rendement que le concept B parce qu'il réalise les gains de B et de C à des frais souples relativement peu élevés. Étant donné la nature subjective des estimations de probabilité sur le changement climatique, on peut entreprendre une analyse de sensibilité pour examiner comment les ensembles différents de probabilités affectent le concept.

L'analyse précédente suppose que : 1) le scénario climatique final se manifeste dans 10 ans et 2) si on opte pour le concept F, le projet sera étendu au concept B si le scénario 2 se produit à cette époque ou étendu au concept C si c'est le scénario 3 qui se produit. Une méthode plus complexe (l'analyse bayésienne) suppose, plus vraisemblablement, que l'incertitude sur le scénario climatique final persiste et elle met à jour les probabilités subjectives en fonction des observations sur la trajectoire du climat (Hobbs 1997; Hobbs *et al.*, 1997). Bien que cette méthode soit plus vraisemblable, elle exige, cependant, une plus grande complexité et plus de données, ce qui n'est actuellement pas pratique dans le contexte des évaluations environnementales.

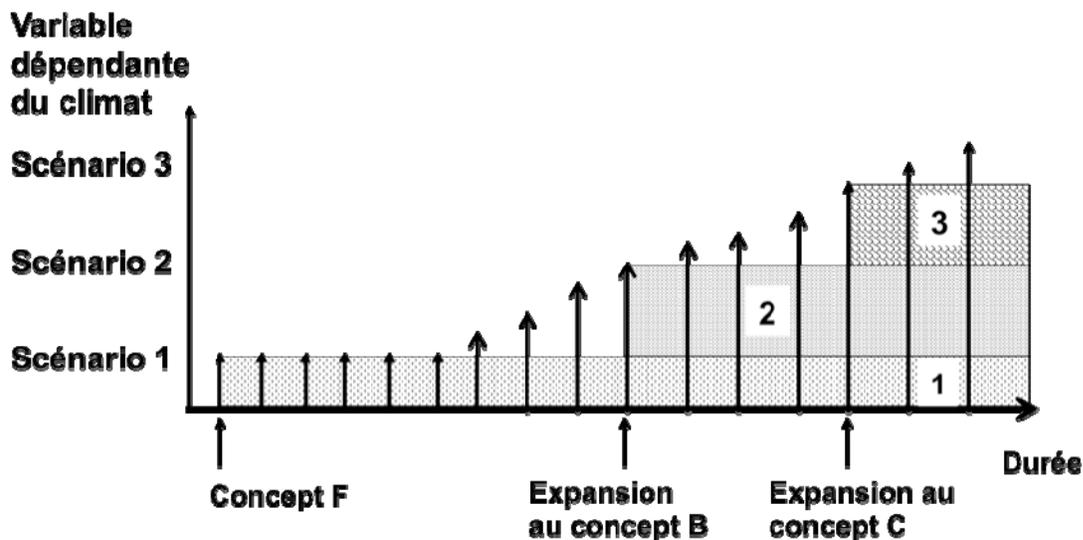
7.5 La transition climatique

À des fins pratiques, les exemples développés jusqu'à présent ne supposent qu'une seule transformation possible pour l'un des trois scénarios climatiques futurs (aucun changement, un changement modéré ou un changement important : scénarios 1, 2 et 3, respectivement) dans 10 ans exactement, à quel moment le changement sera soudain (ex. : une fonction en escalier). En réalité, le climat continue de changer tout au long de la vie du projet.

La figure 7.4 illustre la façon dont ceci pourrait se produire ; le temps est représenté par un axe horizontal et la variable qui nous intéresse du concept dépendant du climat (ex. : les écoulements fluviaux) sur l'axe vertical. La transition est relativement progressive du scénario 1 aux scénarios 2 et 3. On peut entreprendre quelques mesures d'adaptation essentiellement en continu (ex. : les ajustements de la stratégie de lâcher des réservoirs) alors que d'autres, comme l'expansion de la capacité, sont prises en échelons discrets et limités pour des raisons pratiques (ex. : à quelle fréquence fait-on un apport d'équipement de construction sur le site, des disruptions, etc.) et pour des raisons d'économie d'échelle. Selon la gestion adaptative (concept F), on commence par adapter l'installation à l'échelle du scénario 1, ce qui permet de capturer les écoulements fluviaux indiqués à la case 1. Quand le climat atteint le scénario 2, on modifie le concept vers le concept B ce qui permet de capturer la valeur de la hausse de l'écoulement fluvial (indiqué à la case 2) et, quand il atteint le scénario 3, on le modifie de nouveau pour capturer la valeur indiquée à la case 3.

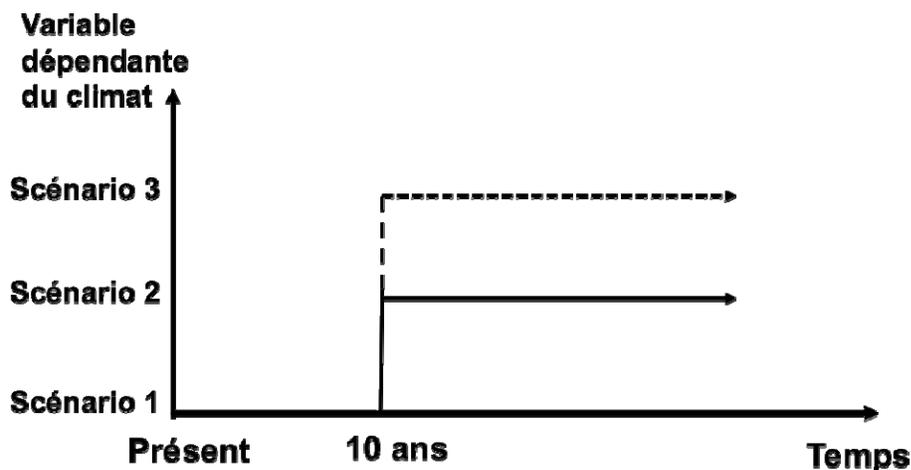
La modification physique du projet devant être effectuée à certains moments donnés discrets, une analyse de gestion adaptative exige de faire des suppositions au sujet des moments spécifiques dans le futur où les décisions devront être prises. La modification du projet serait effectuée après avoir suffisamment confiance que le climat est effectivement en voie de migrer vers un nouveau scénario, qui serait déterminé par des seuils prédéfinis. Ceci exige que des données adéquates soient obtenues au sujet de la variable dépendante du climat. Le plus on attend, le plus on gagne d'assurance, mais au prix d'avoir un concept qui ne correspond pas au changement climatique.

Figure 7.4 La transition climatique progressive et l'expansion de capacité en phases



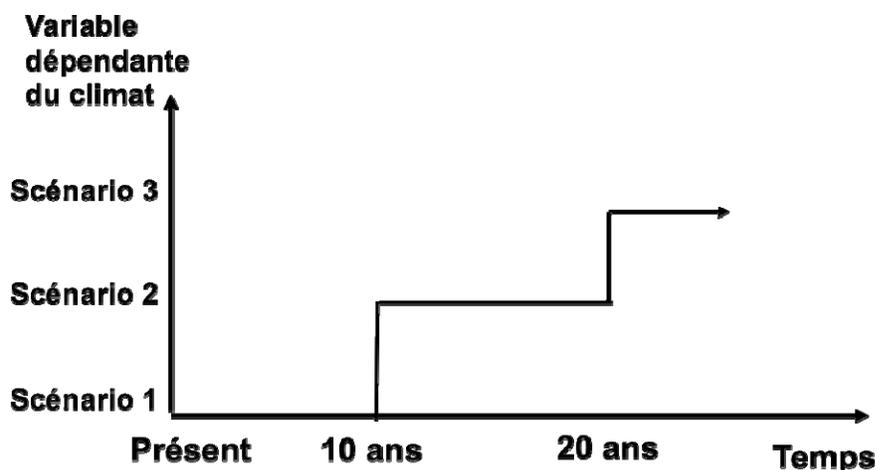
Il existe des scénarios innombrables de transitions possibles et les types d'analyses expliquées ci-dessus les définissent en détails à l'aide d'analyses plus complexes, et en particulier l'usage d'ordinateurs. Les analyses antérieures supposent soit que le climat du scénario 1 ne change pas soit qu'il subit un changement modéré à un certain moment donné (dans 10 ans) au scénario 2 ou qu'il subit un changement important au scénario 3, tel qu'illustré à la figure 7.5.

Figure 7.5 La transition en une seule étape du scénario 1 au scénario 2 ou 3



Un autre scénario (scénario 2 à 3) qui correspond à la figure 7.4 est la transition du scénario 1 au scénario 2 (dans 10 ans) et puis du scénario 2 au scénario 3 (dans 20 ans), tel qu'illustré dans la figure 7.6.

Figure 7.6 La transition en deux étapes du scénario 1 au scénario 3 en passant par le scénario 2 (scénario 2 à 3)



On peut comparer les options de concepts selon le nouveau scénario ou selon tous scénarios de transition. Le tableau 7.14 illustre les matrices des nets gains financiers et des regrets pour tous les concepts et tous les scénarios avec des frais souples de $X = 5$ pour le concept F. Les calculs sont indiqués en détails à l'annexe 2 (section 9.2). La meilleure option est le concept A quand on applique le critère maximin. Le concept F est la meilleure option selon le critère du regret minimax. On obtient les mêmes résultats sans le scénario 2 à 3 (se référer au tableau 7.13). Le scénario 2 à 3 se déroulant plus lentement que le scénario 3, les effets retardés du changement climatique sur les écoulements fluviaux produisent des avantages plus faibles pour les concepts B, C et F. Cependant, à cause de ce retard, les coûts d'expansion sont répartis sur une période plus longue pour le concept F (deux plus petites expansions aux 10^e et 20^e années).

Tableau 7.14 Les matrices des nets gains financiers et des regrets qui incluent la transition en deux étapes (scénario 2 à 3)

Net gain financier (millions de \$)					Matrice des regrets				
Options de concept	Scénario climatique				Options de concept	Scénario climatique			
	1	2	3	2-3		1	2	3	2-3
A	45	50	50	50	A	0	11	45	33
B	36	61	73	70	B	9	0	22	13
C	18	47	89	74	C	27	14	6	9
F	40	60	95	83	F	5	1	0	0

Maximin

Regret minimax

Pour être en mesure d'appliquer le critère de la valeur espérée, on doit estimer les probabilités subjectives du nouveau scénario. Dans ce cas particulier, les probabilités des scénarios 1 et 2 demeurent semblables (0,1 et 0,6). La probabilité qu'il y ait un changement important (soit en une étape dans 10 ans comme dans le scénario 3 soit en deux étapes dans 10 et 20 ans comme dans le scénario 2 à 3) demeure aussi la même (0,3), mais on suppose, à des fins d'illustration, que le changement est également réparti (ex. : 0,15 pour le scénario 3 et 0,15 pour le scénario 2 à 3). Selon ces probabilités, les valeurs espérées de ces options de concepts sont les suivantes :

$$\text{Concept A : EV} = (0,1)45 + (0,6)50 + (0,15)50 + (0,15)50 = 49,5$$

$$\text{Concept B : EV} = (0,1)36 + (0,6)61 + (0,15)73 + (0,15)70 = 61,6$$

$$\text{Concept C : EV} = (0,1)18 + (0,6)47 + (0,15)89 + (0,15)74 = 54,4$$

$$\text{Concept F : EV} = (0,1)40 + (0,6)60 + (0,15)95 + (0,15)83 = 66,7$$

La solution préférée est celle du concept F.

Le fait d'intégrer ce nouveau scénario n'a pas changé les solutions préférées selon ces critères, mais d'autres scénarios auraient pu changer les résultats. Le plus important, c'est que l'analyse inclut la fourchette de scénarios qui risquent de se matérialiser et d'affecter le processus de décision.

7.6 Une complexité accrue: la structure de problèmes à deux attributs

Les concepts alternatifs affecteront vraisemblablement les éléments environnementaux à valeurs multiples. Par exemple, en plus de la production énergétique, le projet devrait affecter les crues en aval en les minimisant. Chaque option de concept présente une différente probabilité d'inondation pour chacun des

scénarios. Le tableau 7.15 indique les matrices des probabilités⁹ des nets gains financiers et des inondations annuelles à ce sujet ; à des fins de simplification, le scénario de transition (scénario 2 à 3) a été omis. L'hypothèse de base est que l'expansion de capacité entraîne des installations plus importantes (ex. : un réservoir plus grand) est qu'en règle générale ceci aboutit souvent, mais pas toujours, à des probabilités d'inondation plus faibles.

Tableau 7.15 Les matrices des nets gains financiers et des probabilités annuelles d'inondation

Net gain financier (millions de \$)				Probabilités d'inondation			
Options de concept	Scénario climatique			Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	45	50	50	A	0,02	0,06	0,15
B	36	61	73	B	0,015	0,08	0,09
C	18	47	89	C	0,01	0,07	0,11
F	40	60	95	F	0,02	0,08	0,11
	Maximin				Minimax		

Idéalement, on souhaite de maximiser nos gains financiers tout en minimisant les inondations. On doit identifier les solutions dominées dès le début. Une alternative, ayant des attributs multiples, est éliminée seulement si elle est dominée par la même alternative dans tous les attributs. Le concept C, dans cet exemple, est dominé par le concept F à l'égard du gain financier, mais n'est pas dominé par le concept F à l'égard de la probabilité d'inondation (en fait, le concept F est dominé par le concept C). Par conséquent, aucun de ces concepts ne peut être exclu pour cause de dominance.

Le concept préféré est identifié en fonction de chaque attribut séparément selon l'attitude du décideur envers les incertitudes sur chaque attribut¹⁰. Ces attributs sont identiques ou différents. Si, par exemple, on applique le critère du regret minimax à chaque attribut (se référer au tableau 7.16), le concept F est la solution préférée (on résout le problème d'égalité entre les concepts B, C et F en donnant la préférence au concept F à l'égard des gains financiers). Dans les cas tels que celui-ci, où les analyses séparées aboutissent à donner la préférence au même concept, il existe une solution préférée qui est évidente dans son ensemble (ex. : F).

⁹ Il s'agit des probabilités hypothétiques qui se réaliseront si les scénarios se matérialisent.

¹⁰ À des fins d'illustration, seuls quelques critères du processus de décision sont utilisés dans les exemples ci-dessous, mais on pourrait appliquer n'importe lesquels des critères discutés ci-dessus (ex. : Hurwicz en fonction d'alpha, la valeur espérée).

Tableau 7.16 Les matrices des regrets pour les deux attributs du net gain financier et de la probabilité d'inondation

Matrice des regrets

Net gain financier (millions de \$)				Probabilités d'inondation			
Options de concept	Scénario climatique			Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	0	11	45	A	0,01	0	0,06
B	9	0	22	B	0,005	0,02	0
C	27	14	6	C	0	0,01	0,02
F	5	1	0	F	0,01	0,02	0,02

Réciproquement, le décideur peut se comporter différemment envers les incertitudes sur des attributs différents. Le décideur peut, par exemple, être plus enclin à prendre des risques avec le gain financier qu'avec les inondations. Dans un cas extrême, on peut appliquer le maximax au gain financier et le minimax aux inondations. Si l'on applique ces critères de décision au tableau 7.15, on remarque que le concept F est l'alternative préférée à l'égard du gain financier et que le concept B est préféré à l'égard des inondations. Ceci crée un conflit entre les concepts alternatifs¹¹.

Les méthodes de visualisation aident à clarifier ces conflits dans un milieu d'attributs multiples. Bell *et al.* (2003, 307) expliquent que : « Étant donné le grand nombre de critères et d'incertitudes sur l'évaluation des impacts, le défi élémentaire est d'afficher des ensembles de données hautement dimensionnelles dans un format qui permet aux utilisateurs de comprendre les tendances générales et les incite à continuer à explorer les résultats. » On suggère les techniques de représentation de données telles que les graphiques à barres, les schémas fonctionnels, les diagrammes à secteurs, les diagrammes cartésiens pour la comparaison en paires des attributs des options de stratégies différentes, etc., comme moyens de présenter les estimations des effets et les incertitudes qui leurs sont associées. Une visualisation effective ainsi que *l'affichage des compromis* sont des moyens simples et transparents d'aide à la compréhension et à la communication des conflits.

¹¹ On remarquera que la même attitude envers les risques appliquée aux deux attributs peut aussi créer un conflit. Un décideur tout aussi prudent à l'égard du gain financier qu'à l'égard des inondations, par exemple, peut appliquer le maximin et le minimax respectivement. Ceci crée un conflit parce que le concept A est préféré pour le gain financier et le concept B est préféré pour les inondations.

Les matrices des tableaux 7.15 et 7.16 illustrent une telle méthode de visualisation. Le fait d'appliquer le maximax au gain financier et le minimax aux inondations crée un conflit entre les concepts B et F ; les matrices du tableau 7.15 identifient clairement les compromis entre ces concepts pour les deux attributs de chaque scénario. Si on choisit le concept B au lieu du concept F et :

Si le scénario 1 se produit : on sacrifie 4 millions de \$ ($40 - 36 = 4$) pour réduire la probabilité d'inondation à 0,005 ($0,02 - 0,015$).

Si le scénario 2 se produit : on gagne 1 million de \$ ($61 - 60 = 1$) pour causer zéro ($0,08 - 0,08$) changement dans la probabilité d'inondation.

Si le scénario 3 se produit : on sacrifie 22 millions de \$ ($95 - 73 = 22$) pour réduire la probabilité d'inondation à 0,02 ($0,11 - 0,09$).

Le fait de comprendre ces compromis aide le décideur à s'orienter vers l'alternative préférée qui dépend aussi de l'importance relative des différents attributs. Ceci exige le recours à la consultation publique qui explique clairement les compromis.

Comme il est expliqué à la section 7.1 et indiqué au tableau 7.6, certains critères sont mesurés qualitativement plutôt que quantitativement. Si, par exemple, les données ne sont pas suffisantes pour leur attribuer les estimations de probabilités d'inondation du tableau 7.15, elles peuvent suffire à estimer les probabilités qualitativement telles qu'illustrées au tableau 7.17.

Tableau 7.17 Un problème à deux attributs ayant des probabilités d'inondation exprimées qualitativement

Net gain financier (millions de \$)				Probabilités d'inondation			
Options de concept	Scénario climatique			Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	45	50	50	A	F	F-M	TE
B	36	61	73	B	TF-F	M	M-E
C	18	47	89	C	TF	M	E
F	40	60	95	F	F	M	E
	Maximin		Maximax			Minimax	

On peut appliquer certains critères de décision, tels que le maximax, le minimax et le maximin, à une matrice qualitative. Le critère minimax, par exemple, conduit au concept B à l'égard des inondations. Une matrice des regrets peut aussi être créée en

fonction de mesures qualitatives. Il est possible aussi de discuter des conflits entre les concepts bien que ce soit plus difficile. Il n'est cependant pas possible d'utiliser des méthodes quantitatives, telles que la valeur espérée ou de Hurwicz en fonction d'alpha, avec des mesures qualitatives.

Les exemples ci-dessus utilisent les probabilités d'inondation qui n'existeront pas avant que les scénarios se matérialisent dans 10 ans. Au cours des 10 ans, cependant, les probabilités d'inondation sont celles qui existent avant la transition du climat (ex. : scénario 1). Il existe donc des probabilités d'inondation avant et après la transition vers les scénarios 2 et 3, tel qu'indiqué au tableau 7.18. (Ces transitions seront plus progressives en réalité.) Si, par exemple, on choisit le concept B et le scénario 3 se matérialise (dans 10 ans), la probabilité d'inondation au cours des premiers 10 ans est de 0,015 (le plan de départ actuel) et de 0,09 par la suite. Dans le cas d'une stratégie de gestion adaptative du concept F, la probabilité d'inondation au cours des premiers 10 ans correspond à celle du concept A et change à celle associée au concept B et C pour les scénarios 2 et 3, respectivement.

Tableau 7.18 Les matrices des nets gains financiers et des probabilités d'inondation avec un changement après 10 ans.

Net gain financier (millions de \$)				Probabilités d'inondation			
Options de concept	Scénario climatique			Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	45	50	50	A	0,02	0,02 0,06	0,02 0,15
B	36	61	73	B	0,015	0,015 0,08	0,015 0,09
C	18	47	89	C	0,01	0,01 0,07	0,01 0,11
F	40	60	95	F	0,02	0,02 0,08	0,02 0,11

Les coûts et avantages de la transition sont indiqués au tableau 7.11 pour le net gain financier et ont été transformés en leur valeur actualisée nette. Ceci ne serait pas possible avec des mesures non économiques et la transition doit être représentée par des nombres différents à des périodes différentes. Il y a donc des paires de probabilités dans les scénarios 2 et 3. Certains critères de décision, tels que le minimax et le regret minimax, peuvent être appliqués dans ces cas. Par exemple, les probabilités maximum des concepts A, B, C et F sont de 0,15, 0,09, 0,11 et 0,11, respectivement. On choisirait le concept B parce c'est le minimum de 0,09. Cependant, ceci fait abstraction du moment et de la durée auxquels s'appliquent ces nombres. Le décideur peut donner la préférence aux valeurs de la période antérieure ou de la période postérieure à la transition, selon la durée de vie du projet et la durée

de ces périodes. À défaut, on pourrait tenter d'employer une valeur moyenne à toutes les périodes différentes.

7.7 Une orientation différente pour les concepts

Les options de concepts des exemples ci-dessus sont axées sur l'optimisation des gains financiers de chaque scénario climatique. Il existe aussi d'autres options qui se concentrent sur des attributs différents (ex. : la protection contre les inondations) ainsi que des concepts qui essaient de traiter des deux à la fois. Au tableau 7.19, les concepts B', C' et F' visent principalement la protection contre les inondations. Le concept A demeure l'alternative conçue pour le climat actuel. La stratégie de gestion adaptative dans ce cas (concept F') respecte le même modèle que celui de sa contrepartie (concept F) : on commence avec le concept A avec la souplesse de s'adapter en fonction des observations dans 10 ans, à laquelle date le concept pourra être modifié en B' ou C' avec les probabilités d'inondation qui leur sont associées. Puisque les concepts B', C' et F' préfèrent la protection contre les inondations à la production d'énergie, les probabilités d'inondation et le net gain financier sont moins élevés que celles des concepts B, C et F, respectivement.

Tableau 7.19 Les nets gains financiers et les probabilités d'inondation pour les concepts orientés vers la protection contre l'inondation incluant la souplesse

Net gain financier (millions de \$)				Probabilités d'inondation			
Options de concept	Scénario climatique			Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	45	50	50	A	0,02	0,02 0,06	0,02 0,15
B'	29	48	58	B'	0,012	0,012 0,03	0,012 0,06
C'	14	38	71	C'	0,008	0,008 0,02	0,008 0,04
F'	35	43	66	F'	0,02	0,02 0,03	0,02 0,04

Il faut encore évaluer et comparer ces options entre elles ainsi qu'entre les concepts B, C et F, tel qu'indiqué au tableau 7.20. On peut utiliser les mêmes méthodes et concepts tels qu'appliqués ci-dessus. On utilise, par exemple, le critère maximin pour le gain financier et le critère minimax pour les résultats des inondations en conflit entre les concepts A et C'. Le fait de présenter ce type d'informations devrait faciliter la discussion entre les décideurs et les autres parties intéressées et les aider à identifier le compromis potentiel parmi ces options de concept, ainsi que parmi d'autres concepts pouvant être pris en considération. F', par exemple, pourrait ressortir dans ce cas comme un compromis prometteur.

Tableau 7.20 Les matrices des nets gains financiers et des probabilités d'inondation pour toutes les options

Net gain financier (millions de \$)				Probabilités d'inondation			
Options de concept	Scénario climatique			Options de concept	Scénario climatique		
	1	2	3		1	2	3
A	45	50	50	A	0,020	0,02 0,06	0,02 0,15
B	36	61	73	B	0,015	0,015 0,08	0,015 0,09
C	18	47	89	C	0,010	0,01 0,07	0,01 0,11
F	40	60	95	F	0,020	0,02 0,08	0,02 0,11
B'	29	48	58	B'	0,012	0,012 0,03	0,012 0,06
C'	14	38	71	C'	0,008	0,008 0,02	0,008 0,04
F'	35	43	66	F'	0,020	0,02 0,03	0,02 0,04

Maximin
Minimax

7.8 Mot de la fin sur les méthodes de décision

Les méthodes classiques de processus de décision offrent des outils très utiles pour comparer les différentes solutions d'adaptation au changement climatique en univers très incertain. Ces méthodes étant relativement simples et transparentes, elles sont bien adaptées aux EE. D'autres méthodes, dont l'analyse de l'utilité à attributs multiples et l'analyse bayésienne sont d'emploi plus complexe et ne sont pas considérées comme appropriées, du moins pour l'instant, comme méthodes d'EE parce qu'elles exigent un type d'informations très difficile à interpréter.

Les premiers exemples ne traitent que d'un attribut à la fois (le gain financier) pour mieux illustrer les différents critères. Les exemples se compliquent avec l'ajout d'un autre attribut (la probabilité d'inondation). C'est en analysant chaque attribut séparément et en comparant les résultats entre les attributs multiples qu'on réussit à déterminer les compromis importants.

Le choix des méthodes dépend de l'attitude que l'on adopte envers les risques et les incertitudes. Si les parties intéressées se mettent d'accord sur la façon d'aborder les risques, en adoptant une grande prudence, on utilise le critère correspondant qui minimise l'effet néfaste. Si, par contre, le décideur et les autres parties intéressées adoptent des attitudes différentes, on applique alors chaque critère correspondant

puis on compare les résultats des options préférées au sein de chaque groupe. Cette démarche aide à identifier s'il existe des conflits et si les conflits ainsi identifiés exigent un supplément d'examen.

Le thème majeur de cette section consiste à examiner les options de gestion adaptatives qui ajustent les concepts au fur et à mesure que les données concernant le changement climatique font leur apparition. De telles options fonctionnent bien comme stratégie d'aversion au risque bien que leur avantage dépende du prix à payer pour permettre de tels changements futurs. Il faut donc aussi en tenir compte avec les autres options d'adaptation de concepts.

8. Conclusions et lignes directrices

Il existe désormais un consensus que le changement climatique aura des répercussions sur l'activité humaine dans un certain nombre de sphères bien que les effets précis en soient encore très incertains. La recherche examine une sélection de différents critères et méthodes du processus décisionnel en univers incertain, pour les EE au niveau du projet. De plus, la gestion adaptative, dont la souplesse permet l'ajustement au changement climatique, est aussi prise en considération comme un moyen de traiter des incertitudes. Les données fondamentales découlent de la recherche sur la façon dont les EE canadiennes récentes de projets traitent des incertitudes sur le changement climatique (Section 5) et sur l'examen d'une sélection de documentation sur les méthodologies qui intègrent l'incertitude dans le processus de décision (Section 6). Le but principal de cette recherche est d'expliquer et de discuter l'utilisation de ces méthodes dans le processus de décision en matière d'adaptation au changement climatique (Section 7).

L'examen de 15 EE provenant d'une variété de secteurs révèle que 13 EE traitent du changement climatique à un certain degré et que plusieurs d'entre elles offrent une analyse extensive utilisant des modèles et des prévisions pour évaluer leur projet. Du fait de la complexité du changement climatique et des difficultés à prédire l'avenir du climat, les promoteurs de projets tendent à favoriser un complément de recherche, de surveillance continue et d'adaptation comme la stratégie la plus pratique. Il nous faut donc trouver des méthodes pour sélectionner les scénarios et les stratégies d'adaptation parce que les promoteurs de projets ont encore beaucoup de difficulté à traiter convenablement du changement climatique. On a aussi besoin de méthodes aidant à identifier les stratégies préférées pour les scénarios futurs incertains.

La plupart des méthodes normalisées d'évaluation d'options de projets, telles que l'analyse coûts - avantages et l'analyse à attributs multiples souffrent de leur incapacité à traiter convenablement des incertitudes caractérisant le changement climatique. La recherche s'est, par conséquent, concentrée sur les modèles de décision classiques de gestion des incertitudes. Ces méthodes offrent des outils utiles à la comparaison des options d'adaptation au changement climatique, dont les stratégies de gestion adaptative qui ajustent les concepts au fur et à mesure que les nouvelles données font leur apparition.

Ces modèles de décision classiques procurent des informations cruciales au processus de décision ; ils exigent de tenir compte explicitement de scénarios futurs alternatifs et d'identifier la façon dont les attitudes envers les risques et les incertitudes affectent le choix de l'option préférée. Les résultats sont transparents et relativement simples à interpréter ce qui facilite ainsi les discussions sur les compromis qui doivent être effectués en fonction des incertitudes.

L'implantation de ces méthodes exige de faire des choix sur des ensembles appropriés de scénarios et d'options d'adaptation, d'évaluer les effets des options conjuguées à des scénarios climatiques futurs, de comprendre les attitudes des décideurs et autres parties intéressées envers les risques et les incertitudes, d'appliquer les règles correspondantes d'aide à la décision et de communiquer effectivement les résultats visant à résoudre les conflits et effectuer des compromis.

Les lignes directrices peuvent tout aussi bien aider les promoteurs à aborder ces problèmes qu'aider les examinateurs à juger si les questions ont été convenablement traitées. Les lignes directrices qui définissent les attentes et les « pratiques exemplaires » relèvent et uniformisent le niveau de la pratique qui est en évolution. On peut les présenter comme une déclaration d'attentes fondamentales telles que « l'établissement de la portée de l'évaluation doit tenir compte des limites spatiales et temporelles du projet » ou comme des « guides » qui expliquent les méthodes visant à répondre aux attentes. L'Agence offre aussi des lignes directrices « Intégration des considérations relatives au changement climatique à l'évaluation environnementale : guide général des praticiens », préparé en novembre 2003 par le comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale (Canada CFPT, 2003). Tel que mentionné dans l'introduction, le guide a posé des jalons importants en clarifiant l'importance de tenir compte du changement climatique dans les EE et en offrant des conseils d'ordre général sur la manière de le faire. Il recommande aux promoteurs « la détermination de la sensibilité du projet aux paramètres climatiques et à la variabilité climatique » et « la communication aux décideurs d'intérêt public du contexte lié au changement climatique dans lequel s'inscrit le nouveau développement proposé » (Canada GIEC, p.2). Les lignes directrices du GIEC offrent des conseils d'ordre général, mais ne procurent pas d'informations sur les méthodes de gestion de l'incertitude dans le processus de décision.

Byer *et al.* (2004) procurent une liste suggérée de lignes directrices d'ordre général sur la façon de traiter de l'incertitude sur le changement climatique dans les EE de projets. Parmi celles-ci, les promoteurs de projets devraient explicitement :

- i) déterminer et définir si et dans quelle mesure le changement climatique futur affecte le projet directement et traiter de ces incertitudes au niveau des effets ;
- ii) et pour chacune des vulnérabilités du projet :
 - identifier une méthode ou des méthodes appropriées au traitement des incertitudes fondées sur le niveau d'analyse requis pour cet effet particulier ;
 - justifier le choix d'une ou des méthodes ;

- communiquer les résultats de l'analyse de façon à ce que les décideurs et les parties intéressées comprennent les implications liées à ces incertitudes.

Le but principal de ce rapport de recherche est d'aider les promoteurs à aborder ces problèmes. La liste suivante suggère des lignes directrices d'ordre général sur le choix et l'utilisation de méthodes d'aide à la décision concernant l'adaptation au changement climatique et aux incertitudes qui lui sont associées. L'initiateur devrait explicitement :

- i) déterminer et définir si et dans quelle mesure le changement climatique futur affecte le projet directement ;

et pour chacune des vulnérabilités du projet :

- ii) déterminer la portée potentielle du changement climatique et sélectionner les scénarios de changement climatique qui caractérisent le mieux cette portée et la synchronisation des effets ;
- iii) déterminer des options de conception y compris les stratégies de gestion adaptative permettant d'adapter le projet aux scénarios climatiques futurs ;
- iv) estimer le niveau de l'effet de chaque option de concept pour chaque scénario ;
- v) déterminer et justifier le choix approprié d'une ou des méthodes d'aide à la décision qui consistent à comparer les options de concepts en fonction des effets estimés et des attitudes des décideurs envers les risques et les incertitudes ;
- vi) communiquer les résultats de l'analyse de façon à ce que les décideurs et les parties intéressées comprennent les implications liées aux incertitudes et aux compromis des différentes options de concepts.

Chacune de ces lignes directrices d'ordre général devrait être développée en des lignes directrices plus détaillées et inclure les commentaires des promoteurs visés, des réviseurs de l'agence, des experts-conseils et des organisations non gouvernementales qui s'intéressent au changement climatique. La discussion et les explications contenues dans ce rapport peuvent procurer des conseils utiles à l'élaboration de lignes directrices plus approfondies.

9. ANNEXES

9.1 Annexe 1 : Horaire du groupe de travail et de ses participants

**Groupe de travail sur
Le processus décisionnel en univers incertain
visant l'adaptation au changement climatique
des évaluations environnementales de projets**

Mardi 27 avril 2010

**Université de Toronto
Édifice Galbraith, 35, rue St. George
Salle GB202**

Organisé dans le cadre d'un projet de recherche financé par
L'Agence canadienne d'évaluation environnementale

HORAIRE

8 h 30	Enregistrement et petit-déjeuner continental
9 h 00	Introduction <ul style="list-style-type: none">- Projet de recherche antérieur- Revue des pratiques des EE- But du projet actuel et du groupe de travail
9 h 45	Discussion
10 h 15	Pause
10 h 30	Les critères et les méthodes d'aide à la décision pour traiter des incertitudes
12 h 00	Pause avec déjeuner compris
12 h 30	Discussion durant le déjeuner <ul style="list-style-type: none">- Utilisation des critères et des méthodes- Questions essentielles- Ce qui pourrait aider les praticiens- Élaboration des lignes directrices à l'intention des praticiens
14 h 00	Les prochaines étapes et conclusion
14 h 30	Fin de l'atelier

Participants

Brad Bass
Section de la recherche sur l'adaptation et les répercussions climatiques
Environnement Canada

Dave Broadhurst
Sciences de la météorologie et de l'atmosphère et unité d'applications
Environnement Canada

Cristian Ches
Étudiant diplômé
Département de géographie, Université de Toronto

Quentin Chiotti
Conseiller scientifique
Pollution Probe

Dana Fountain
Étudiant diplômé
Université York

Danny Harvey
Professeur, Département de géographie
Université de Toronto

David Kellershohn
Ingénieur principal
Toronto Water
Ville de Toronto

Melanie Lalani
Santé Canada

Sheryl Lusk
Coordinateur d'EE, Région de l'Ontario
Environnement Canada

Jim MacLellan
IRIS, Institute for Research and Innovation in Sustainability
Université York

David MacLeod
Spécialiste principal de l'environnement
Toronto Environment Office

Ville de Toronto

Simon Miles
Conseiller environnemental
Secrétaire, Ontario Association for Impact Assessment
Toronto

Linda Mortsch
Section de la recherche sur l'adaptation et les répercussions climatiques
Environnement Canada

Phil Shantz
SENES Consultants Ltd.

Caitlin Sykes
Ontario Power Generation

May Lyn Trudelle
Coordinateur principal de l'appui à la recherche
Direction des évaluations et des autorisations environnementales
Ministère de l'Environnement de l'Ontario

Beth Williston
Directeur, Évaluations environnementales
Division de la planification et du développement
Toronto Region Conservation Authority

Julian Scott Yeomans
Professeur, Schulich School of Business
Université York

Présentateurs et organisateurs

Philip Byer
Professeur, Department of Civil Engineering and Centre for Environment
Université de Toronto

Andrew Colombo
Associé en recherche
Département d'ingénierie
Université de Toronto

Andrea Sabelli
Assistante à la recherche

9.2 Annexe 2 : Calculs généralisés du net gain financier

Cette annexe illustre les calculs généralisés des valeurs actualisées nettes calculées dans plusieurs des tableaux de la section 7.3 à la section 7.7. Le tableau 9.1 indique des formules utilisées pour calculer le net gain financier (en termes de VAN) pour les différentes paires de scénarios et de concepts.

Tableau 9.1 Détermination généralisée de la valeur actualisée nette pour les trois concepts et la souplesse

Options de concept	Valeur actualisée nette (VAN)		
	Scénario climatique		
	1	2	3
A	$R_{11}/d - C_1$	$R_{11}(PIA,d,n) + (R_{12}/d)(PIF,d,n) - C_1$	$R_{11}(PIA,d,n) + (R_{13}/d)(PIF,d,n) - C_1$
B	$R_{21}/d - C_2$	$R_{21}(PIA,d,n) + (R_{22}/d)(PIF,d,n) - C_2$	$R_{21}(PIA,d,n) + (R_{23}/d)(PIF,d,n) - C_2$
C	$R_{31}/d - C_3$	$R_{31}(PIA,d,n) + (R_{32}/d)(PIF,d,n) - C_3$	$R_{31}(PIA,d,n) + (R_{33}/d)(PIF,d,n) - C_3$
F	$R_{11}/d - (C_1 + X)$	$R_{11}(PIA,d,n) + [(R_{22}/d)(PIF,d,n) - [(C_1 + X) + (C_2 - C_1)(PIF,d,n)]]$	$R_{11}(PIA,d,n) + [(R_{33}/d)(PIF,d,n) - [(C_1 + X) + (C_3 - C_1)(PIF,d,n)]]$

d = taux d'actualisation; n = nombre d'années jusqu'à ce que le changement soit connu
 (PIA,d,n) = facteur de la série des coefficients d'actualisation; X = frais souples.

R_{11} est le net gain financier annuel si le concept A est construit et si le scénario 1 persiste. Si les scénarios 2 et 3 se produisent plus tard, R_{11} est réalisé pour les premières n années du projet ; ensuite, ce sera soit R_{12} soit R_{13} qui se produira à perpétuité pour les scénarios 2 et 3, respectivement. R_{12} est le net gain annuel si le scénario 2 se matérialise dans n années et si le concept A est construit maintenant (ce flux de trésorerie débute en l'an n et continue à perpétuité). Le même raisonnement est maintenu pour les autres gains R . C_1 , C_2 et C_3 sont les coûts de l'année 0 sauf pour le concept F où $(C_2 - C_1)$ et $(C_3 - C_1)$ se produisent dans l'année n .

La notation $(P/F,d,n)$ est la notation caractéristique du coefficient d'actualisation de l'économie appliquée à l'industrie : elle traduit la valeur actuelle P , selon une valeur future de F et un taux d'actualisation de d , composé n fois. Le coefficient d'actualisation $(P/F,d,n)$ est égal à $(1 + d)^{-n}$. Le taux d'actualisation de 5 %, par exemple est composé annuellement et un coût de 120 \$ est subi à la fin de 10 ans ; la VAN du flux de trésorerie est calculée comme il suit :

$$120 \$ (P/F, 5 \%, 10) = 120 \$ (1 + 0,05)^{-10} = 73,67 \$$$

L'expression $(P/A, d, n)$ est connue comme la série des coefficients d'actualisation et est utilisée pour calculer la valeur actuelle P d'une série de paiements uniformes A , effectués à la fin de chaque période d'actualisation pour un certain nombre de périodes de n , à un taux composé de d . Par exemple, une série de dix paiements de 100 \$ ($A = 100$) effectués à la fin de chaque année pendant 10 ans est exprimée comme il suit :

$$100 \$ (P/A, 5\%, 10) = 100 \$ (7,722) = 772,20 \$$$

Si le montant A continue à perpétuité, ex. : $n = \infty$, $(P/A, d, n) = A/d$. Les formules composées et les valeurs tabulées pour les taux d'intérêt courants et pour les périodes variées peuvent être trouvées dans les manuels d'économie appliquée à l'industrie.

Selon la gestion adaptative (concept F), la différence principale dans la structure arbitraire est que le coût supplémentaire est subi dans l'année n pour l'expansion du projet. À partir de la fin de l'année n , on traite les flux de trésorerie comme une perpétuité dont la valeur capitalisée est alors actualisée n années jusqu'à présent. Si la durée de vie du projet était relativement courte, ex. : 30 ans, il serait plus rigoureux d'utiliser une annuité finie.

Le scénario de transition 2 à 3 requiert une étape supplémentaire pour calculer la valeur actuelle du net gain financier du projet (indiquée au tableau 9.2) puisqu'il y a trois intervalles : les premiers 10 ans, de la 10^e à la 20^e année et après la 20^e année. On suppose que le projet continue assez longtemps après la 20^e année pour être en mesure d'appliquer l'équation d'une perpétuité ($P = A/d$).

Tableau 9.2 Calcul de la valeur actualisée nette pour le scénario de transition, scénario 2 à 3

Valeur actualisée nette (VAN)	
Options de concept	Scénario 2 à 3
A	$R_{11}(P/A, d, 10) + R_{12}(P/A, d, 10)(P/F, d, 10) + (R_{13}/d)(P/F, d, 20) - C_1$
B	$R_{21}(P/A, d, 10) + R_{22}(P/A, d, 10)(P/F, d, 10) + (R_{23}/d)(P/F, d, 20) - C_2$
C	$R_{31}(P/A, d, 10) + R_{32}(P/A, d, 10)(P/F, d, 10) + (R_{33}/d)(P/F, d, 20) - C_3$
F	$R_{11}(P/A, d, 10) + R_{22}(P/A, d, 10)(P/F, d, 10) + (R_{33}/d)(P/F, d, 20) - [(C_1 + X) + (C_2 - C_1)(P/F, d, 10) + (C_3 - C_2)(P/F, d, 20)]$

9.3 Annexe 3 : Le regret du choix du concept et les frais souples

Cette annexe discute en plus amples détails de la relation entre les frais souples et le regret expliqué à la section 7.3.

Le tableau 9.3 indique la matrice des regrets pour le schéma ayant 2 concepts pour 2 scénarios plus l'option de souplesse quand X reste une variable.

Tableau 9.3 Matrice des regrets pour les deux concepts et pour la souplesse exprimée en frais souples X

Options de concept		Matrice des regrets		
		Scénario climatique		
		1	2	
		$0 \leq X \leq 4$	$X > 4$	
A	0	$15 - X$	$11 \leftarrow 61 - 50$	
B	9	$4 - X$	0	
F	X	0	$X - 4 \leftarrow 61 - (65 - X)$	$(65 - X) - 61$

« Le point d'alternance » au critère du regret minimax correspond aux frais souples de $X = 9$, le prix le plus élevé devant être payé pour la souplesse. Après ce point-ci, il vaut mieux construire la plus grande capacité du concept B dès le début. Tous frais souples supérieurs à 9 causent l'abandon de la préférence du concept F (en concevant soit pour le scénario 1 soit pour le 2 tout de suite et en rejetant la souplesse) parce que, si le scénario 2 ne se matérialise pas dans 10 ans, le fait de le construire (concept B) maintenant entraîne moins de coûts (ex. : un regret moindre). Le concept F ne sera pas le concept préféré même si le scénario 1 se maintient après 10 ans parce que le concept B comporte des coûts plus faibles à l'année 0 et entraîne ainsi un regret moindre. Essentiellement, les coûts souples élevés font que la VAN du concept F du scénario 1 est inférieure à celle du concept B et on trouve le regret maximum le plus faible au concept B.

Pour les frais souples de $X < 4$, le concept F offre la VAN la plus élevée ($65 - X$) dans le cas où le scénario 2 se matérialise et il sert de référence pour calculer les regrets de cette colonne ($0 < X < 4$). Alors que X augmente au-dessus de zéro, la différence entre la VAN du concept B et celle de F diminue ($65 - X - 61$). Une fois que $X > 4$, la VAN du concept B avec le scénario 2 est supérieure et on passe au concept B pour adopter la référence d'estimation des regrets. À ce point-ci, le regret associé au

concept B devient zéro et il augmente linéairement proportionnellement aux frais souples $(X - 4)$.

10. Références

- Auld, H. E. "Adaptation by design: the impact of changing climate on infrastructure." *Journal of Public Works & Infrastructure* 1, 3 (2008): 276–288.
- Auld, H., D. MacIver et J. Klaassen. *Adaptation Options for Infrastructure under Changing Climate Conditions*. Occasional Paper 10, Adaptation and Impact Research Division. Toronto: Environnement Canada, 2007.
- Bell, M. L. *et al.* "An evaluation of multi-criteria methods in integrated assessment of climate policy." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 10 (2001): 229–256.
- Bell, M. L., B. F. Hobbs et H. Ellis. "The use of multi-criteria decision-making methods in the integrated assessment of climate change: implications for IA practitioners." *Socio-Economic Planning Sciences* 37 (2003): 289–316.
- Bretteville, C. *Decision Criteria under Uncertainty and the Climate Problem*. Working paper no. 10. Oslo, Norway: CICERO – Center for International Climate and Environmental Research, 1999.
- Byer, P. H., M. J. Lalani et J. S. Yeomans. "Addressing and communicating climate change and its uncertainties in project environmental impact assessments." *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 11, 1 (2009): 29–50.
- Byer, P. H. et J. S. Yeomans. "Methods for addressing climate change uncertainties in project environmental impact assessments." *Impact Assessment and Project Appraisal* 25, 2 (2007): 85–99.
- Byer, P. H., J. S. Yeomans et M. Lalani. "Addressing Climate Change Uncertainties in Project Environmental Assessments." Rapport de recherche pour l'Agence canadienne d'évaluation environnementale (ACEE), mars 2004.
- Canada. Environnement Canada. *Environment Canada's Written Submission to the JRP EIS Conference, June 29, 2005. Concerns Regarding Future Climate Variability*. Date de consultation : 15 septembre 2009. URL : <http://www.ngps.nt.ca/Upload/Intervenens/Environment%20Canada/EC%20Climate%20Variability%20Sufficiency%20Submission.pdf>, 2005.
- Canada. Comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale de 2003 (Canada CFPT, 2003) (CFPT). *Intégration des considérations relatives au changement climatique à l'évaluation environnementale : Guide général des praticiens*. URL : <http://www.ceaa.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=A41F45C5-1&offset=3&toc=show> N° de catalogue En106-50/2003, ISBN 0-662-67812-5. 2003.

Canada. Gouvernement du Canada (GC). *Vivre avec les changements climatiques au Canada 2007*.

Canadian Institute for Climate Studies (CICS). *Canadian Climate Impacts Scenarios*.
Date de consultation : 24 avril 2003. URL :
<<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi>>, 2003.

Clarke, H. "Classical decision rules and adaptation to climate change." *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 52 (2008): 487–504.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).
Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and
adaptation to climate change." Rapport préparé par Stratus Consulting Inc. pour le
Secrétariat de CCNUCC, 2008.

de Bruin, K. C., R. B. Dellink et R. S. J. Tol. "AD-DICE – an implementation of
adaptation in the DICE model." *Climatic Change* 95 (2009a): 63–81.

de Bruin, K. C. *et al.* "Adapting to climate change in The Netherlands: an inventory of
climate adaptation options and ranking of alternatives." *Climatic Change* 95
(2009b): 23–45.

de Neufville, R. "Architecting/designing engineering systems using real options." MIT
Engineering Systems Symposium on the Intellectual Foundations of Engineering
Systems, mai 2002.

———. *Uncertainty Management for Engineering Systems Planning and Design*.
Engineering Systems Monograph, Engineering Systems Symposium, March 29–
31. Cambridge, MA: MIT, 2004.

Dessai, S. et J. van der Sluijs. *Uncertainty and Climate Change Adaptation – a
Scoping Study*. Utrecht, Netherlands: Copernicus Institute for Sustainable
Development and Innovation, 2007.

Dobes, L. "Getting real about adapting to climate change: using 'real options' to
address the uncertainties." *Agenda* 15, 3 (2008): 55–69.

Encana Shallow Gas Infill Project. Le projet de forage intercalaire de puits de gaz peu
profonds dans la réserve de faune de Suffield par Encana. *Environmental Impact
Statement for the Encana Shallow Gas Infill Development in the CFB Suffield
National Wildlife Area*. Date de consultation : 3 octobre 2009. URL:
<[http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/
document-eng.cfm?document=21310](http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/document-eng.cfm?document=21310)>, 2007.

Feenstra, J. F. *et al.*, eds. *Handbook on Methods for Climate Change Impact
Assessment and Adaptation Strategies*, version 2.0, octobre 1998. Amsterdam:
United Nations Environment Programme (UNEP) et the Institute for Environmental
Studies, Vrije Universiteit, 1998.

GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport du Groupe de travail II - Conséquences, adaptation et vulnérabilité. *IPCC. Climate Change 2001: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Édés J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken et K. S. White. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

———. Changements climatiques 2007 : Rapport du Groupe de travail II - Conséquences, adaptation et vulnérabilité. *IPCC. Climate Change 2007: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Édés M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden et C. E. Hanson. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

Grima, A. P. *et al. Risk Management and EIA: Research Needs and Opportunities*. Ottawa: Canadian Environmental Assessment Research Council, 1986.

Hauser, C. E. et H. P. Possingham.. "Experimental or precautionary? Adaptive management over a range of time horizons." *Journal of Applied Ecology* 45, 1 (2008): 72–81.

Hobbs, B. F. "Bayesian methods for analysing climate change and water resource uncertainties." *Journal of Environmental Management* 49 (1997): 53–72.

Hobbs, B. F., P. T. Chao et B. N. Venkatesh. "Using decision analysis to include climate change in water resources decision making." *Climatic Change* 37 (1997): 177–202.

Janssen, R. "On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessments in the Netherlands." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 10 (2001): 101–109.

Kassouf, S. *Normative Decision Making*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc, 1970.

Keeney, R. et H. Raiffa. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York: Wiley & Sons, 1976.

Lalani, M. J. A review of the consideration of climate change in recent environmental assessments and recommendations for guidelines." M.A. paper, Department of Geography, University of Toronto, 2003.

Lee, K. N. "Appraising adaptive management." *Ecology and Society* 3, 2 (1999).

Lifson, M. *Decision and Risk Analysis for Practicing Engineers*. Boston, MA: Cahnern Books, 1972.

- Le projet d'aménagement hydroélectrique du cours inférieur de Churchill. *Environmental Impact Statement. Nalcor Energy*. Date de consultation : 13 septembre 2009. URL : <<http://www.acee-ceaa.gc.ca/050/Document-eng.cfm?DocumentID=31991>>, 2009.
- Le projet d'assainissement des étangs bitumineux et des sites de fours à coke de Sydney. *Joint Review Panel Environmental Assessment Report*. Date de consultation : 2 octobre 2009. URL : <<http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/19345/19345E.pdf>>, 2006.
- Le projet Bruce Power. *Bruce New Nuclear Power Plant Project Environmental Assessment*. Date de consultation : 15 septembre 2009. URL : <<http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/Document-eng.cfm?DocumentID=29380>>, 2008.
- Le projet d'expansion hydroélectrique de Waneta. *Projet d'expansion hydroélectrique de Waneta, Rapport d'évaluation relatif à l'examen de la demande de certification environnementale*. Date de consultation : 12 septembre 2009. URL : http://www.ceaa.gc.ca/FABAB7E3-docs/report_f.pdf
- Le projet de gazoduc Emera. *Rapport d'évaluation environnementale de l'Office National de l'énergie*. Date de consultation : 12 septembre 2009. URL : <http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/20343/20343F.pdf>>, 2007.
- Le projet hydroélectrique de Dunvegan, Glacier Power Ltd.. *Environmental Impact Assessment*. Date de consultation : 12 septembre 2009. URL : <http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents_staticpost/cearef_2996/006/0_0.pdf>, 2006.
- Le projet de complexe hydroélectrique de la Romaine. *Complexe de la Romaine. Étude d'impact sur l'environnement*. Hydro-Québec. Date de consultation : 12 septembre 2009. URL : <http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents_staticpost/cearef_2613/ei_sommaire.pdf>, 2007.
- Le projet de la mine Cheviot. Rapport de la Commission d'examen conjoint EUB-ACÉE URL : <http://www.ceaa.gc.ca/D9BC55EE-docs/rapport-fra.pdf>
- Le projet de mine d'or et de cuivre Prosperity. *Taseko Prosperity Gold-Copper Project Environmental Impact Statement/Application*. Date de consultation : 16 septembre 2009. URL : <<http://www.ceaa.gc.ca/050/document-eng.cfm?document=32276>>, 2009.
- Le projet du parc éolien de l'île Wolfe. Wolfe Island Wind Project Environmental Review Report. Date de consultation : 15 septembre 2009. URL : <<http://www.gov.pe.ca/envengfor/index.php3?number=1011005&lang=E>>, 2007.
- Le projet du parc éolien de Melancthon Grey. *Melancthon Grey Wind Project Environmental Screening Report*. Date de consultation : 15 septembre 2009. URL :

<http://www.canhydro.com/projects/melancthonwind/Plant/docs/Mel_I_Scrng_Rprt/FinalESR.pdf>, 2005.

Le projet du parc éolien Summerside. *Environmental Impact Assessment City of Summerside Wind Farm Final Report*. Date de consultation : 15 septembre 2009. URL : <<http://www.gov.pe.ca/envengfor/index.php3?number=1011005&lang=E>>, 2008.

Le projet des sables bitumineux Kearl. *Environmental Impact Assessment Kearl Oil Sands Project – Mine Development*. Date de consultation : 3 octobre 2009. URL : <<http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/Document-eng.cfm?DocumentID=18778>>, 2007.

Le projet gazier Mackenzie. *Environmental Impact Statement for the Mackenzie Gas Project*. Date de consultation : 14 septembre 2009. URL: <http://www.ngps.nt.ca/applicationsubmission/Documents/MGP_EIS_Vol1_TOC_S.pdf>, 2004.

Maass, A. *et al. Design of Water-Resource Systems*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1962.

McBeath, J. “Institutional responses to climate change: the case of the Alaska transportation system.” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 8 (2003): 3–28.

Paoli, G. *Climate Change, Uncertainty and Decision-Making*. Waterloo, ON: The Institute for Risk Research, University of Waterloo, 1994.

Qin, X. S. *et al.* “A MCDM-based expert system for climate-change impact assessment and adaptation planning – A case study for the Georgia Basin, Canada.” *Expert Systems with Applications* 34 (2008): 2164–2179.

Réseau canadien des scénarios de changements climatiques (RCSCC). 10 novembre 2010. URL : <<http://www.cccsn.ca/>>, 2010.

Steele, K. *et al.* “Uses and misuses of multicriteria decision analysis (MCDA) in environmental decision making.” *Risk Analysis* 29, 1 (2009): 26–33.

Stern, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

Welch, D. A. *Decisions, Decisions: The Art of Effective Decision Making*. Amherst, NY: Prometheus Books, 2002.

Willows, R. I. et R. K. Connell, eds. *Climate Adaptation: Risk, Uncertainty and Decision-making*. UKCIP Technical Report. Oxford: United Kingdom Climate Impacts Programme, 2003.

Yang, M. *et al.* “Evaluating the power investment options with uncertainty in climate policy.” *Energy Economics* 30 (2008): 1933–1950.