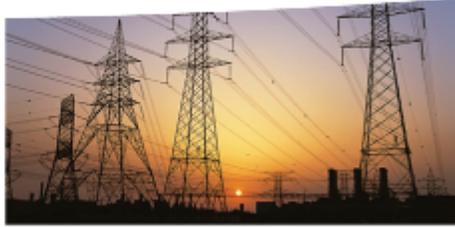




CIRAIG^{MC}

Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services



RAPPORT FINAL ANALYSE DU CYCLE DE VIE COMPARATIVE D'AMPOULES ÉLECTRIQUES : INCANDESCENTES ET FLUORESCENTES COMPACTES 24 avril 2008

Préparé pour :

Hydro-Québec Distribution

À l'attention de Madame **Louise Houde**
Conseillère recherche scientifique – Gestion des contaminants
Unité Environnement, Direction Expertise et soutien à la
réalisation des travaux
680, rue Sherbrooke Ouest, 20^e étage
Montréal (Québec) H3A 2M7

Par :

Renée Michaud, ing.
Claude Belley, DÉSS éco-conseil

Département de Génie chimique
École Polytechnique de Montréal

Soumise par :

BUREAU DE LA RECHERCHE ET CENTRE DE
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE (B.R.C.D.T.)
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Campus de l'Université de Montréal
Case Postale 6079, succursale Centre-ville
Montréal (Québec) H3C 3A7

Pr. Réjean Samson, ing., Ph.D
Directeur du projet

CIRAIG

Centre interuniversitaire de recherche
sur le cycle de vie des produits, procédés et services
École Polytechnique de Montréal
Département de génie chimique
2900, Édouard-Montpetit
Montréal (Québec) Canada
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
H3C 3A7

www.ciraig.org

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Réalisé par :

Renée Michaud, ing.
Analyste principale

Claude Belley, DÉSS éco-conseil
Analyste stagiaire

Collaborateurs :

Édouard Clément, ing., M.Sc.A.
Coordonnateur technique

Coordination du projet

Manuele Margni, Ph.D.
Agent de recherche

Support scientifique

Réjean Samson, ing., Ph.D.
Directeur

Direction scientifique

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Hydro-Québec Distribution a sollicité le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), afin qu'il réalise une analyse comparative du cycle de vie d'ampoules électriques incandescentes et fluorescentes compactes (fluocompactes) utilisées dans un contexte québécois.

Plus particulièrement, les **objectifs** de ce projet étaient : 1) d'établir le profil environnemental des deux types d'ampoules ; 2) d'en identifier les « points chauds » ; et 3) de comparer ces alternatives sur la base d'une analyse de scénarios. Il visait à permettre à Hydro-Québec d'améliorer sa compréhension des impacts associés au cycle de vie des ampoules et à lui fournir des éléments de réponse quant à la substitution des ampoules incandescentes par des fluocompactes.

Ce document constitue le rapport final du projet déposé suite au processus de revue critique. Il comprend le modèle d'étude employé pour l'analyse du cycle de vie (ACV) comparative des ampoules, les résultats d'inventaire, de même que l'évaluation et l'interprétation des impacts potentiels.

Une revue bibliographique a d'abord montré qu'il existe peu de publications portant sur l'ACV d'ampoules électriques. Deux études ont tout de même été répertoriées, soient celles de Pfeifer (1996), rapportée par Bio Intelligence Service (2003), et de Parsons (2006). Celles-ci font ressortir la supériorité des ampoules fluocompactes relativement aux incandescentes selon un facteur de 4 à 5. L'analyse de ces publications a par contre montré la nécessité d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité québécoise, notamment en ce qui a trait au mélange d'approvisionnement en énergie du réseau électrique (*grid mix*), ayant une influence potentiellement importante sur la performance environnementale durant l'utilisation. Aucune de ces études ne tient par ailleurs compte de l'effet croisé de la chaleur dégagée à l'intérieur des habitations durant cette étape d'utilisation des ampoules. Selon le **principe de l'effet croisé**, ces gains internes de chaleur constituent soit une charge supplémentaire pour les systèmes de climatisation, soit une réduction de charge pour les systèmes de chauffage. Cet aspect semble important dans un contexte québécois, considérant que les ampoules incandescentes génèrent davantage de chaleur que les fluocompactes.

La revue effectuée a tout de même permis de dresser un portrait préliminaire du cycle de vie des ampoules fluocompactes et incandescentes et d'orienter l'établissement du cadre méthodologique sur lequel a été basée l'ACV. Celui-ci a été établi de manière à :

1. Être adapté à la réalité québécoise, en termes de représentativité des données (en particulier en ce qui a trait au mode de production de l'électricité) ;
2. Considérer l'effet croisé de la chaleur générée par les ampoules.

La **fonction étudiée** consistait à *éclairer (fournir entre 500 et 900 lumens) sur une période donnée (10 000 heures)*. L'effet des **fonctions secondaires** des ampoules (p. ex. : apporter une ambiance agréable) a été négligé, à l'exception de l'effet croisé de la chaleur générée, lequel a été considéré selon une analyse de scénarios de la manière suivante :

- Le **scénario de base** néglige la chaleur émise pendant l'utilisation en tant que coproduit, c.-à-d. qu'il ne considère pas ses effets sur les systèmes de chauffage et de climatisation des habitations. Le profil environnemental de ce scénario correspond à celui du cycle de vie des ampoules, incluant leurs diverses fonctions (p. ex. : éclairer et chauffer). Il permet donc de répondre aux deux premiers objectifs du projet, soient d'établir le profil du cycle de vie des ampoules et d'en identifier les « points chauds » et les paramètres environnementaux clés.
- Le **scénario « effet croisé »** vise quant à lui à répondre au troisième objectif du projet en « créditant » au cycle de vie des ampoules l'impact évité d'une production équivalente de chaleur par un système de chauffage (ou en y ajoutant l'impact associé à un processus supplémentaire de climatisation). Dans ce cas, le profil environnemental obtenu correspond à celui de la fonction principale des ampoules, soit d'éclairer, en excluant le chauffage (fonction secondaire). Il est à noter que le scénario « effet croisé » a été développé en sous-scénarios, de manière à représenter divers contextes québécois typiques.

Il est aussi à noter que les **scénarios de fin de vie** initialement proposés n'ont pas été réalisés dans le cadre de ce projet. Ce choix est justifié à la sous-section 5.2.2.

Les **flux de référence** pour cette étude correspondaient à la quantité d'ampoules requises afin de fournir entre 500 et 900 lumens pendant 10 000 heures. Ils sont les suivants :

- Système A : 1 ampoule fluocompacte 13 ou 15 W (durée de vie : 10 000 heures) ;
- Système B : 10 ampoules incandescentes 60 W (durée de vie : 1 000 heures).

Les **frontières du système** comprennent quant à elles la production, la distribution, l'utilisation et la gestion en fin de vie des deux types d'ampoules, incluant la production et le transport des ressources consommées, de même que le transport et la gestion des résidus générés.

Les **données primaires** ont essentiellement été collectées auprès de divers manufacturiers présents sur le marché québécois des ampoules. Le processus de collecte a été assuré par l'entremise d'un questionnaire (transmis par voie électronique) et de discussions téléphoniques. Les informations demandées visaient à obtenir les spécifications techniques, la liste des matériaux, ainsi qu'un portrait des étapes de fabrication et de distribution de leur modèle le plus vendu des deux types d'ampoules à l'étude. Les données collectées incluent des données se rapportant aux produits vendus par les plus grands manufacturiers au Québec (plus particulièrement Phillips, Globe et Sylvania).

Des **hypothèses** ont par ailleurs été établies quant aux mélanges énergétiques des réseaux électriques (*grid mix*) chinois et québécois, à la consommation d'énergie pour la production des ampoules, aux modes de gestion des déchets d'emballage et des ampoules en fin de vie et aux distances et modes de certains transports impliqués durant le cycle de vie des ampoules. Ces hypothèses sont précisées à la section 4.2.

Enfin, tous les processus de production des ressources consommées et de gestion des déchets générés, ainsi que tous les transports impliqués aux diverses étapes du cycle de vie des ampoules ont été modélisés sur la base de **données secondaires** disponibles. Puisque la plupart des processus élémentaires figurant dans les systèmes à

l'étude se retrouvaient dans la banque de données ICV *ecoinvent* (<http://www.ecoinvent.ch/>), et afin de maximiser l'uniformité et la cohérence des données utilisées pour les modéliser, cette banque a été privilégiée et adaptée lorsque possible (plus particulièrement en ce qui a trait aux contextes énergétiques québécois et nord américain).

Enfin, les données collectées ont été évaluées sur la base de la méthode d'**évaluation des impacts du cycle de vie** (ÉICV) internationalement reconnue IMPACT 2002+. Les résultats obtenus ont aussi été comparés à ceux obtenus à partir de la méthode canadienne LUCAS, qui a fourni essentiellement les mêmes conclusions.

À la lumière des résultats obtenus, l'**étape d'utilisation** domine le cycle de vie des deux types d'ampoules, suivie de l'**étape de production**. Cette dernière est responsable de 6 à 30 % des dommages potentiellement associés au cycle de vie de la fluocompacte, alors qu'elle n'en représente que 1 à 5 % dans le cas de l'incandescence. La distribution et la fin de vie s'avèrent quant à elles négligeables dans les deux cas.

L'utilisation, qui représente entre 69 et 93 % des potentiels de dommages dans le cas de la fluocompacte et entre 93 et 99 % dans le cas de l'incandescence est dominée par la **consommation d'électricité**. Cette dernière est quant à elle dominée, selon les catégories de dommage, soit par la production même de l'électricité (notamment dû aux faibles quantités achetées et produites à partir de charbon et de gaz industriel) soit par sa transmission (production de cuivre et émissions au sol de cuivre et de chrome VI associées à l'infrastructure des réseaux).

D'autre part, la comparaison des profils environnementaux obtenus pour les deux types d'ampoules favorise l'une ou l'autre des deux alternatives selon les conditions d'éclairage, définies par :

- Le nombre de jours par année :
 - En saison chaude c.-à-d. lorsque les habitations ne sont pas chauffées mais qu'elles peuvent être climatisées ;
 - En saison froide c.-à-d. lorsque les habitations sont chauffées.
- Le nombre d'heures d'éclairage par jour selon les saisons.

Ainsi, l'effet croisé de la chaleur dégagée par les ampoules pendant ces heures d'éclairage a été considéré pour le cas d'une habitation chauffée à l'électricité, au gaz ou au mazout, l'effet croisé de cette chaleur sur les systèmes de climatisation s'étant avéré être négligeable. Il est aussi à noter que le chauffage au bois n'est pas considéré bien qu'il représente 9 % du chauffage au Québec. Ceci s'explique par le fait que la chaleur dégagée par l'ampoule n'a pas d'impact sur ce type de chauffage puisqu'il n'est pas contrôlé par un thermostat. Il n'y a donc pas d'effet croisé possible.

Les résultats considèrent donc une utilisation annuelle de l'un ou l'autre des deux types d'ampoules, ce qui implique que le crédit environnemental pour le chauffage évité n'est attribué que pour une fraction (environ 60 %) des 10 000 heures d'éclairage considérées par l'unité fonctionnelle. L'attribution d'un crédit pour le chauffage évité durant 10 000 heures d'utilisation (et donc, en considérant une utilisation des ampoules en saison froide uniquement) modifie légèrement les profils environnementaux obtenus mais les conclusions demeurent les mêmes. Plus particulièrement, en considérant une utilisation annuelle de l'un ou l'autre des deux types d'ampoules :

- Le dommage associé au cycle de vie des fluocompactes représente, selon les catégories de dommage, entre 20 et 30 % de celui associé aux incandescentes (28 % en moyenne).
- L'éclairage à partir d'ampoules fluocompactes, plutôt qu'incandescentes, est donc accompagné d'une diminution globale des dommages en **saison chaude et neutre**, de même qu'en **saison froide** pour une **habitation chauffée à l'électricité**. Dans ce dernier cas, le crédit accordé n'est en effet pas suffisant pour compenser les dommages associés au cycle de vie des ampoules (principalement à l'étape d'utilisation) et la fluocompacte demeure l'option la plus favorable.
- Bien que l'avantage potentiel de l'ampoule incandescente sur la fluocompacte ne soit pas clairement ressorti pour le cas d'une habitation chauffée au gaz ou au mazout, les résultats sont majoritairement en sa faveur :
 - Pour le cas d'une **habitation chauffée au gaz naturel**, l'utilisation d'ampoules incandescentes est l'option la plus favorable selon les dommages associés aux changements climatiques et aux ressources. De plus, bien que les dommages à la santé humaine et à la qualité des écosystèmes soient en faveur des fluocompactes, le gain net associé à l'utilisation de ce type d'ampoule est plus de 5 fois inférieur au gain net associé à l'utilisation d'incandescentes pour les catégories « changements climatiques » et « ressources » ;
 - De la même manière, pour le cas d'une **habitation chauffée au mazout**, l'utilisation d'incandescentes a obtenue, pour 3 des 4 catégories de dommage, un gain net plus de 15 fois supérieur au gain obtenu par la fluocompacte pour le seul dommage à la qualité des écosystèmes.

Dans ce cas, le crédit accordé arrive ainsi à compenser certains dommages du cycle de vie des ampoules. Plus précisément, ce crédit vient du fait qu'une quantité de chaleur autrement produite par un système au mazout ou au gaz est « évitée », en la remplaçant par de la chaleur produite à l'électricité et donc, moins dommageable (l'électricité consommée par les ampoules pour l'éclairage). Comme ce crédit est supérieur dans le cas des incandescentes, l'utilisation de ce type d'ampoule devient plus avantageuse sous certaines conditions.

La **répartition moyenne des types de chauffage au Québec** possède par ailleurs un profil similaire à celui de l'habitation chauffée au gaz naturel, bien qu'il soit légèrement moins favorable à l'ampoule incandescente. Selon ces résultats, une utilisation des fluocompactes à l'échelle québécoise (par l'entremise d'une politique publique, par exemple) n'est donc pas favorable en tous points. Comme mentionné, en effet, l'utilisation d'incandescentes peut être avantageuse en saison froide (environ 55 % de l'année) dans les habitations chauffées au gaz et au mazout (23 % des habitations québécoises), bien que la fluocompacte s'avère être un choix plus convenable lorsque :

- Il n'y a pas d'effet croisé possible, c.-à-d. en saisons chaude ou neutre et en saison froide pour les habitations chauffées au bois (9 % des habitations) ou dont l'isolation est déficiente (et que le point de consigne du thermostat n'est jamais atteint) ; et que

- Le crédit environnemental dû à l'effet croisé n'est pas suffisant pour compenser les dommages associés au cycle de vie des ampoules, c.-à-d. en saison froide pour les habitations chauffées à l'électricité (68 % des habitations).

Également, selon les résultats de l'**analyse d'incertitude** réalisée, il est peu probable que ces conclusions soient inversées pour tous les scénarios étudiés, sauf pour le cas de la répartition des types de chauffage au Québec. Dans ce dernier cas, il est en effet difficile d'identifier laquelle des deux alternatives est, plus probablement, préférable à l'autre. Ceci confirme la mise en garde précédente quant à la promotion à grande échelle de l'ampoule fluocompacte dans un contexte énergétique québécois.

Ces résultats présentent cependant certaines **limites**. Ainsi, d'autres types et/ou modèles d'ampoules utilisées sur le marché canadien pourraient éventuellement être intégrés au modèle d'étude de manière à fournir une meilleure représentativité de la technologie fluocompacte et d'étendre les conclusions au contexte canadien. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent donc être évitées.

D'autres limites pouvant être soulevées relativement aux conclusions obtenues concernent l'applicabilité des diverses hypothèses au cycle de vie des ampoules utilisées au Québec, en 2006, de même que la complétude et la validité des données d'inventaire et des méthodes d'évaluation des impacts employées. Bien qu'il soit fort probable que ces limites n'affectent pas les conclusions de l'analyse pour la plupart, un affinement des données, des hypothèses et/ou des modèles utilisés diminuerait l'incertitude des résultats, plus particulièrement en ce qui a trait aux « points chauds » ressortis des analyses de contribution et de sensibilité réalisées, c.-à-d. :

- La complétude (ressources et rejets non considérés) et la validité des données employées pour modéliser les étapes de production et de fin de vie.
- La validité des données employées pour modéliser l'étape d'utilisation (plus particulièrement les processus et paramètres identifiés au Tableau 5-2).
- La valeur du coefficient de performance (COP) des systèmes de chauffage au gaz naturel, pour lesquels le dommage à la santé humaine pourrait favoriser davantage la fluocompacte.
- L'impact des substances non caractérisées qui pourraient modifier les conclusions obtenues pour le cas des habitations chauffées au gaz et au mazout.
- Les conséquences possibles de privilégier un type d'ampoule plutôt qu'un autre (la présente étude ne couvrant effectivement pas les conséquences d'une pénétration importante des fluocompactes à l'échelle québécoise, ses conclusions ne fournissent qu'une partie des éléments de réponse devant être considérés dans le processus décisionnel).

Dans le but d'appuyer une éventuelle décision, l'analyse pourrait effectivement être affinée selon une approche axée sur les conséquences (ou ACV conséquentielle). Une telle approche permettrait de quantifier les écarts de performance environnementale entre les deux types d'ampoule selon les diverses décisions potentielles d'Hydro-Québec quant à l'utilisation de l'électricité produite par son réseau. Les résultats de l'analyse de sensibilité ont en effet montré que l'utilisation d'ampoules incandescentes, même en saison froide dans les habitations chauffées au gaz et au mazout, n'est probablement pas la solution la plus favorable dans un contexte énergétique nord-

américain (c.-à-d. dans un système ouvert, où les variations de consommation d'une région ont un effet plus ou moins direct sur les consommations dans une autre région).

À titre indicatif, la figure suivante présente les résultats effectivement obtenus selon la répartition moyenne des types de chauffage au Québec, dans un contexte énergétique québécois et nord-américain. Pour chacun des contextes, et pour chaque catégorie de dommage, trois barres sont indiquées, la première représentant la fluocompacte, la deuxième l'incandescente et la troisième la différence entre les deux types d'ampoules. Il est important de noter que toutes les contributions sont exprimées en termes relatifs puisqu'elles sont rapportées au total obtenu pour le scénario de base de l'incandescente, correspondant ainsi la valeur de 100 %. Il est aussi important de préciser que cette valeur de 100 % diffère pour chaque contexte énergétique et pour chaque catégorie de dommage. Par exemple, pour la catégorie « changement climatique », elle correspond à 21 kg CO₂ en utilisant un *grid mix* québécois, alors qu'elle correspond à 424 kg CO₂ en utilisant un *grid mix* nord-américain.

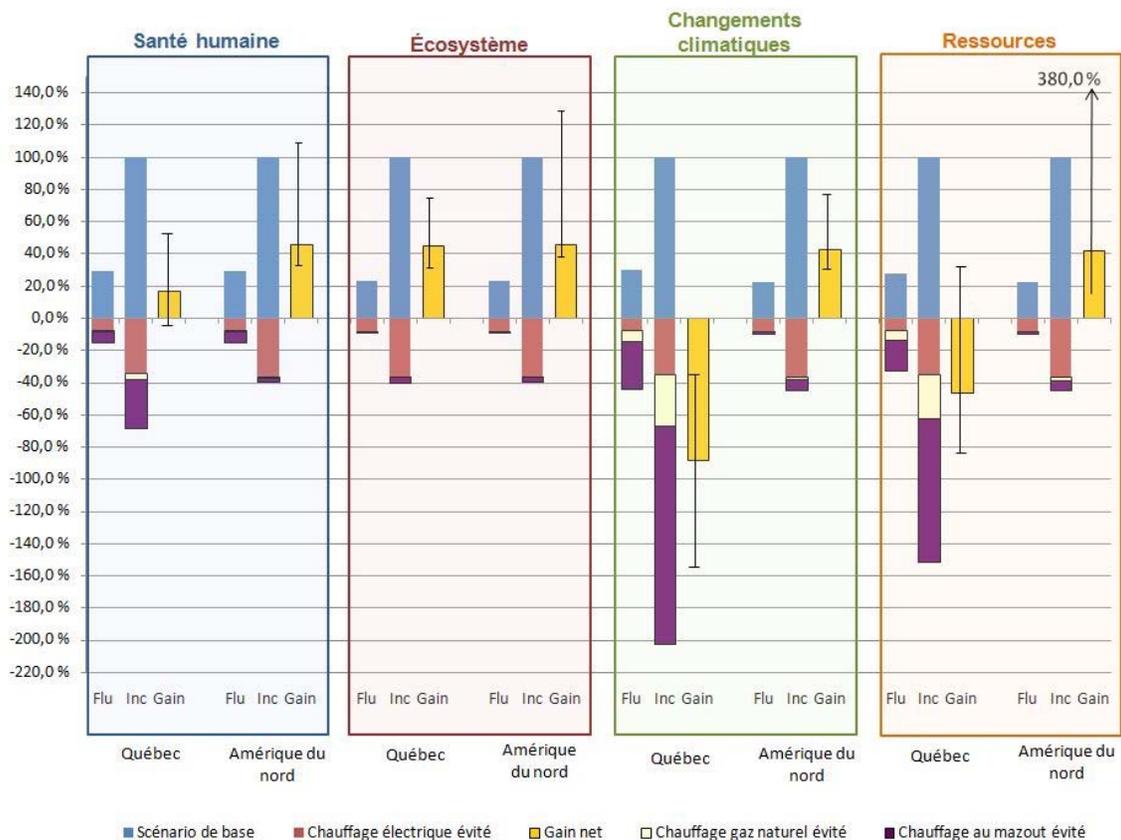


Figure I : Dommages associés au scénario « effet croisé » selon la répartition moyenne des types de chauffage au Québec, dans un contexte énergétique québécois et nord-américain.

Ainsi, en supposant que chaque kWh économisé pourrait substituer des formes d'énergie plus polluantes ou moins efficaces que le chauffage au gaz ou au mazout (en particulier l'électricité d'origine thermique), il semble plus optimal de privilégier l'emploi d'ampoules fluocompactes à grande échelle, de manière à favoriser globalement l'efficacité énergétique.

Enfin, malgré que l'ampoule fluocompacte soit, dans la plupart des cas, moins dommageable que l'incandescente sur l'ensemble de son cycle de vie, ses étapes de **production** et de **fin de vie** devraient être améliorées, plus particulièrement en ce qui a trait aux composantes électroniques et au mercure qu'elle contient. À cet effet, l'utilisation de ballasts modulaires (c.-à-d. non intégrés et donc, réutilisables) et la récupération/recyclage des ampoules en fin de vie constituent des options intéressantes a priori. Seuls des résultats d'ACV permettraient toutefois de quantifier les améliorations potentielles.

Il est aussi à noter que les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels. Ils n'expriment par ailleurs pas le risque individuel notamment associé à une exposition suite à un bris accidentel d'ampoules fluocompactes dans un environnement clos, ni l'influence de certains paramètres plus ou moins importants du point de vue de l'utilisateur (p. ex : interférence avec dispositifs infrarouge, température de fonctionnement (min-max), utilisation avec gradateurs et phénomènes de distorsion harmonique).

Une fiche synthèse de cette étude est présentée en Annexe E du présent rapport.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
2.1 APERÇU DES AMPOULES ÉLECTRIQUES EMPLOYÉES AU QUÉBEC.....	2
2.2 ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES DU CYCLE DE VIE D'AMPOULES ÉLECTRIQUES	4
3. MODÈLE D'ÉTUDE.....	8
3.1 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	8
3.1.1 <i>But de l'étude</i>	8
3.1.2 <i>Application envisagée</i>	8
3.1.3 <i>Public concerné</i>	9
3.2 CHAMP DE L'ÉTUDE	9
3.2.1 <i>Fonctions, unité fonctionnelle et flux de référence</i>	9
3.2.2 <i>Frontières et description des systèmes de produits</i>	10
3.2.3 <i>Approche d'imputation</i>	14
3.2.4 <i>Hypothèses générales</i>	14
3.2.5 <i>Données d'inventaire du cycle de vie (ICV)</i>	15
3.2.6 <i>Évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV)</i>	17
3.2.7 <i>Méthode de calcul</i>	18
3.2.8 <i>Revue critique</i>	18
3.2.9 <i>Applications et limites de l'ACV</i>	19
4. ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE (AICV)	21
4.1 METHODOLOGIE DE COLLECTE ET SOURCES DES DONNEES	21
4.2 DESCRIPTION DES SYSTEMES DE PRODUITS ET DES HYPOTHESES DU MODELE ACV	22
4.2.1 <i>Étape de production</i>	22
4.2.2 <i>Étape de distribution</i>	24
4.2.3 <i>Étape d'utilisation</i>	25
4.2.4 <i>Étape de fin de vie</i>	28
4.3 SOMMAIRE DES SOURCES DE DONNEES UTILISEES	28
4.4 RÉSULTATS DU CALCUL DE L'INVENTAIRE.....	30
4.4.1 <i>Quantification des flux intermédiaires primaires</i>	30
4.4.2 <i>Quantification des flux élémentaires</i>	32
5. ÉVALUATION DES IMPACTS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	34
5.1 ÉVALUATION DU SCÉNARIO DE BASE	34
5.1.1 <i>Résultats d'indicateur de dommage/d'impact</i>	34
5.1.2 <i>Analyse de contribution</i>	36
5.2 ÉTUDE DE SCENARIOS	37
5.2.1 <i>Scénario « effet croisé »</i>	37
5.2.2 <i>Scénarios de fin de vie</i>	41
5.3 ANALYSES D'INCERTITUDE.....	42
5.3.1 <i>Scénario de base</i>	43
5.3.2 <i>Scénario « effet croisé»</i>	43
5.4 ANALYSES DE SENSIBILITÉ.....	46
5.4.1 <i>Choix des hypothèses</i>	47
5.4.2 <i>Choix des données génériques</i>	49
5.4.3 <i>Comparaison de méthodes ÉICV</i>	50
5.5 LIMITES DE L' AICV ET DE L'ÉICV	51

6. CONCLUSION	54
6.1 PROFIL ENVIRONNEMENTAL DES AMPOULES FLUOCOMPACTES ET INCANDESCENTES	54
6.2 CONDITIONS FAVORISANT UNE ALTERNATIVE COMPARATIVEMENT À L' AUTRE, CONSIDÉRANT L'EFFET CROISÉ DE LA CHALEUR... ..	54
7. RÉFÉRENCES	56
ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)	59
ANNEXE B : MÉTHODES D'ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE (ÉICV)	61
ANNEXE C: DONNÉES, HYPOTHÈSES ET RÉSULTATS	63
ANNEXE D: RAPPORT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE ET RÉPONSES DU CIRAIG AU COMITÉ	65
ANNEXE E: FICHE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE ACV.....	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Modèles d'ampoules des 3 principaux manufacturiers au Québec	4
Tableau 2-2 : Principaux paramètres et conclusions des études répertoriées	6
Tableau 3-1 : Processus initialement inclus dans l'ACV des deux types d'ampoules (scénario de base).....	13
Tableau 3-2 : Correspondances entre les catégories de dommage et les catégories d'impact des méthodes IMPACT 2002+ et LUCAS	18
Tableau 4-1 : Principaux matériaux contenus dans une ampoule	23
Tableau 4-2 : Nombre d'heures d'éclairage par année au Québec, selon les saisons ...	26
Tableau 4-3 : Consommation énergétique (kWh) des ampoules selon les saisons	26
Tableau 4-4 : Répartition des types de chauffage/climatisation au Québec	27
Tableau 4-5 : Habitations québécoises typiques modélisées par le scénario « effet croisé »	28
Tableau 4-6 : Sommaire des données requises et des sources de données utilisées pour le scénario de base	29
Tableau 4-7 : Flux intermédiaires primaires du scénario de base	31
Tableau 4-8 : Énergie évitée aux systèmes de chauffage et charge supplémentaire sur les systèmes de climatisation pour 10 000 heures (4,47 années) d'éclairage	32
Tableau 5-1 : Écart des résultats d'indicateur (dommage et impact) entre les étapes d'utilisation et de production des ampoules.....	35
Tableau 5-2 : Paramètres environnementaux clés liés à la consommation d'électricité (bas voltage) selon le mélange d'approvisionnement en énergie du réseau d'Hydro-Québec	36
Tableau 5-3 : Catégories d'impact dont le plus grand contributeur (fluocompacte vs incandescente) est différent de celui observé au dommage	40
Tableau 5-4 : Hypothèses quant à l'incertitude des données primaires	42
Tableau 5-5 : Qualification des données.....	51
Tableau 5-6 : Critères de qualification des données.....	53

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Parts de marchés (2005) selon SECOR conseil.....	2
Figure 2-2 : Parts de marchés des deux types d'ampoules selon SECOR conseil.	3
Figure 3-1 : Frontières des systèmes à l'étude.	11
Figure 5-1 : Dommages associés au scénario de base pour les deux types d'ampoules.	34
Figure 5-2 : Dommages associés au scénario « effet croisé » pour le cas d'une habitation chauffée à l'électricité.	38
Figure 5-3 : Dommages associés au scénario « effet croisé » pour le cas d'une habitation chauffée au gaz naturel.	38
Figure 5-4 : Dommages associés au scénario « effet croisé » pour le cas d'une habitation chauffée au mazout.	39
Figure 5-5 : Dommages associés au scénario « effet croisé » selon la répartition moyenne des types de chauffage au Québec.	41
Figure 5-6 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario de base.	43
Figure 5-7 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Habitation chauffée à l'électricité.	44
Figure 5-8 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Habitation chauffée au gaz naturel.	45
Figure 5-9 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Habitation chauffée au mazout.	45
Figure 5-10 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Chauffage selon la répartition moyenne au Québec.	46
Figure 5-11 : Dommages associés au scénario « effet croisé » selon la répartition moyenne des types de chauffage au Québec, dans un contexte énergétique nord-américain.....	50

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

AC	Acidification
ACO	Appauvrissement de la couche d'ozone
ACV	Analyse du cycle de vie
AMI	<i>Assessment mean impact</i>
CFC	Chlorofluorocarbones
CFL	<i>Compact fluorescent lamps</i>
CH ₄	Méthane
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO ₂	Dioxyde de carbone
COD	Carbone organique dissout
COP	Coefficient de performance
COT	Carbone organique total
COV	Composés organiques volatils
DALY	<i>Disability-adjusted life-years</i>
DBO	Demande biologique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
EC50	<i>Effect concentration 50 %</i>
EC	Écotoxicité
ECA	Écotoxicité aquatique
ECT	Écotoxicité terrestre
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
EUA	Eutrophisation aquatique
EUT	Eutrophisation terrestre
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPCC	<i>Intergovernmental panel on climate change</i> (GIEC en français)
ISO	Organisation internationale de normalisation
kWh	Kilowatts*heures
LOEC	<i>Low observed effect concentration</i>
LUCAS	<i>Life cycle impact assessment method Used for a Canadian specific context</i>
NLPIP	<i>National Lighting Product Information Program</i>
N ₂ O	Oxyde nitreux
NOEC	<i>No observed effect concentration</i>
NO _x	Oxydes d'azotes
PAF	<i>Potentially affected fraction</i>
PDF	<i>Potentially disappeared fraction</i>

PE	Polyéthylène
PP	Polypropylène
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> ou Chlorure de polyvinyle
RG ₁₀₀	Réchauffement global sur 100 ans
SAFE	<i>Schweizerische Agentur für Energieeffizienz</i> (Agence suisse pour l'efficacité énergétique)
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SSEE	<i>Society for Sustainability and Environmental Engineering</i>
SO ₂	Dioxyde de soufre
SP	Smog photochimique
ToxC	Toxicité humaine « cancer »
ToxNC	Toxicité humaine « non-cancer »
TRACI	<i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts</i>
UE	Utilisation de l'eau
UR	Utilisation des ressources abiotiques
UT	Utilisation des terres
W	Watts

1. INTRODUCTION

L'efficacité énergétique fait, depuis longtemps, l'objet d'un engagement soutenu et continu de la part d'Hydro-Québec. Une de ses interventions en la matière consiste à suggérer à sa clientèle de remplacer les ampoules électriques à incandescence par des ampoules fluorescentes compactes (fluocompactes). Ces dernières sont présumées être plus écologiques parce qu'elles consomment jusqu'à 75 % moins d'énergie pour produire la même quantité de lumière tout en présentant une plus longue durée de vie.

Or, ce gain environnemental apparent en faveur des ampoules fluocompactes ne tient compte que d'une étape du cycle de vie du produit, à savoir son étape d'utilisation. Les ressources consommées et les polluants émis lors de sa production, sa distribution, ainsi que son élimination en fin de vie utile n'ont, à ce jour, pas été considérées par Hydro-Québec dans le processus menant à la recommandation d'une alternative plutôt que d'une autre. Cet aspect semble d'autant plus pertinent considérant le fait que les ampoules fluocompactes contiennent du mercure et qu'elles sont considérées comme des déchets ménagers dangereux. De plus, il est souvent mis en évidence qu'une ampoule incandescente génère davantage de chaleur pouvant contribuer au chauffage des bâtiments. Selon le principe de l'effet croisé, les gains internes de chaleur durant l'éclairage constituent effectivement une charge supplémentaire pour les systèmes de climatisation ou encore, une réduction de charge pour les systèmes de chauffage (Parent, 2007). Cet aspect semble potentiellement significatif dans un contexte québécois.

C'est ainsi qu'Hydro-Québec Distribution a sollicité le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), afin qu'il réalise une analyse du cycle de vie (ACV) comparative des deux types d'ampoules utilisées dans un contexte québécois. L'ACV est un outil méthodologique permettant d'évaluer, sur la base de méthodes internationalement reconnues, les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agit donc d'une approche holistique, qui permet d'identifier les « points chauds » d'un système et d'éviter que des solutions adoptées ne résultent en des déplacements de pollution d'étapes du cycle de vie ou de catégories d'impacts à d'autres.

Les objectifs de l'étude et la méthodologie employée sont détaillés au chapitre 3, tandis que les chapitres 4 et 5 exposent les résultats des phases subséquentes de l'ACV, conformément à l'Organisation internationale de normalisation (série ISO 14 040).

Le cadre méthodologique présenté au chapitre 3 ayant notamment été établi sur la base d'une revue des informations disponibles se rapportant au sujet à l'étude, cette dernière est résumée au chapitre suivant (chapitre 2).

Enfin, il est à noter que l'Annexe A présente la méthodologie ACV plus en détail, comprenant une section définissant divers termes spécifiques au domaine. Une fiche synthèse des résultats de l'étude est par ailleurs présentée en Annexe E.

2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre présente un aperçu des ampoules fluocompactes et incandescentes employées au Québec, suivi d'une revue des études disponibles sur l'impact environnemental du cycle de vie des deux types d'ampoules.

2.1 Aperçu des ampoules électriques employées au Québec

Selon l'étude de Marcon-DDM (2006), la fluocompacte de substitution la plus vendue au Québec est l'ampoule torsadée, avec ballast intégré, de 13 à 15 watts (W), certifiée *Energy Star*. Comme elle est munie d'un culot à vis (par opposition à la fluocompacte d'intégration, munie d'un culot à broches), cette dernière est normalement considérée équivalente à l'ampoule incandescente 60 W (en termes de quantité de lumière fournie).

Comme illustré à la Figure 2-1, le marché québécois des ampoules fluocompactes est par ailleurs dominé par 3 grands manufacturiers : Sylvania, Philips et Globe (82 %). Ces derniers produisent également des ampoules incandescentes, bien qu'ils n'en soient possiblement pas les principaux manufacturiers (information non disponible).

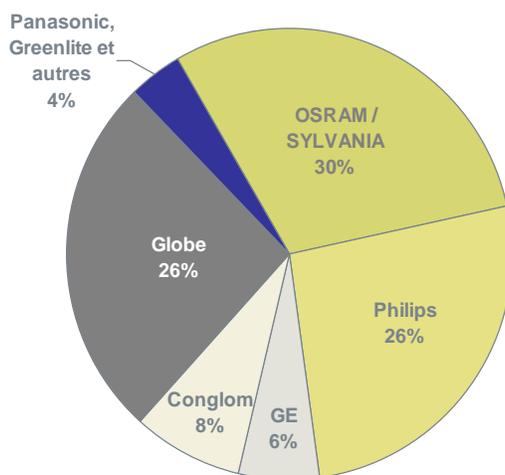


Figure 2-1 : Parts de marchés (2005) selon SECOR conseil.
(Hydro-Québec Distribution, 2007)

Les centres de rénovation ont quant à eux été les grands vendeurs (détaillants) d'ampoules fluocompactes, au Québec, en 2004. Dans le domaine des incandescentes, le marché était séparé entre les grandes surfaces et les centres de rénovation (Figure 2-2).

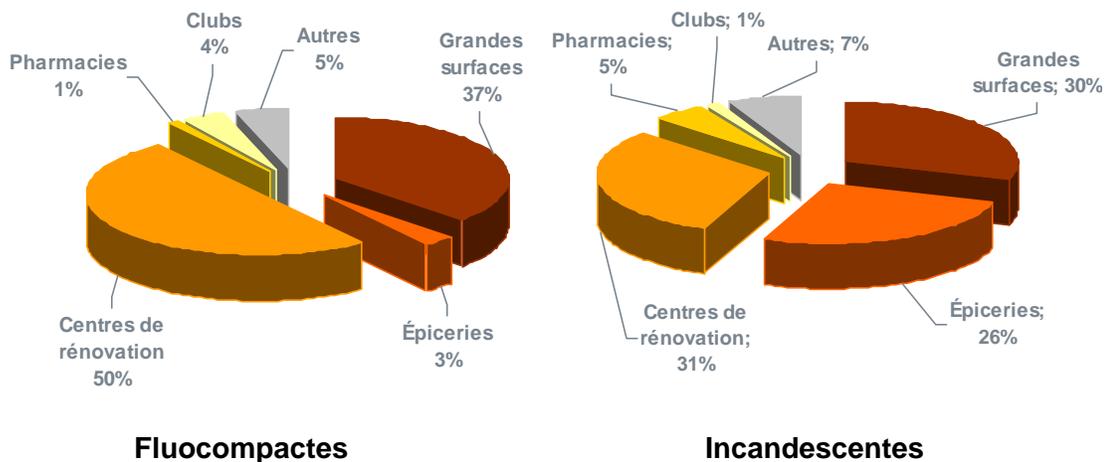


Figure 2-2 : Parts de marchés des deux types d'ampoules selon SECOR conseil.
(Hydro-Québec Distribution, 2007)

Le Tableau 2-1 résume quant à lui les résultats d'une collecte d'informations réalisée par le CIRAIG, en juin 2007, chez divers détaillants de la région montréalaise. Il présente, à la fois pour les fluocompactes 13 ou 15 W et pour les incandescentes 60 W, différents modèles d'ampoules de chacun des 3 grands manufacturiers. Ces modèles représentent les plus vendus, basés sur les quantités disponibles en magasin (les modèles les plus disponibles correspondant à la demande des consommateurs). Le tableau expose également la provenance (lieu de production) de chaque modèle, de même que leurs spécifications quant au nombre de lumens fourni (quantité de lumière) et à leur durée de vie.

Il est à noter que les modèles les plus disponibles étaient, pour la plupart, de type « *Soft White* » dans le cas des fluocompactes et de type « *Standard* » dans le cas des incandescentes. Ces deux types sont supposés équivalents, notamment en termes de « qualité » de lumière fournie (pouvant être quantifiée par la température et l'indice de rendu des couleurs). La correspondance de chaque type avec une température des couleurs spécifique n'étant pas standardisée, il existerait toutefois des variations et des inconsistances entre les divers manufacturiers. L'équivalence des modèles d'ampoules comparés a ainsi dû être vérifiée auprès des manufacturiers lors du processus de collecte des données.

Tableau 2-1 : Modèles d'ampoules des 3 principaux manufacturiers au Québec

Détaillant	Manufacturier	Modèle	Type	Quantité de lumière (lumens)	Durée de vie (heures)	Provenance
Fluocompacte de substitution torsadée, avec ballast intégré, 13 ou 15 W						
Home-Depot	Philips	Marathon taille mini – 15 W	Day Light	950	10000	Chine
Wal-Mart	Philips	Marathon taille mini – 15 W	Soft White	860	10000	Chine
Wal-Mart	Globe	Torsadé taille mini – 13 W	Soft White	800	10000	Chine
Rona Le Quincaillier	Globe	Torsadé – 13 W	Soft White	800	10000	Chine
Rona l'Entrepôt	Globe	Torsadé taille mini – 13 W	Soft White	800	6000	Chine
Rona Le Quincaillier	Sylvania	Torsadé taille mini – 13 W	Soft White	900	10000	Chine
Rona l'Entrepôt	Sylvania	Torsadé taille mini – 13 W	Day Light extra	850	8000	Chine
Rona l'Entrepôt	Sylvania	Torsadé taille mini – 13 W	Soft White	900	10000	Chine
Incandescente 60 W						
Home-Depot	Philips	S/O	Standard	820	1000	Indonésie
Home-Depot	Philips	S/O	Day Light	680	1000	Mexique
Rona Le Quincaillier	Globe	S/O	Standard	540	1000	Chine
Wal-Mart	Globe	S/O	Standard	600	1000	Chine
Rona l'Entrepôt	Sylvania	S/O	Standard	870	1000	États-Unis
Rona l'Entrepôt	Sylvania	S/O	Day Light	640	1000	États-Unis
Rona l'Entrepôt	Sylvania	S/O	Claire	880	1000	États-Unis

2.2 Études environnementales du cycle de vie d'ampoules électriques

Il existe peu de références bibliographiques portant sur l'analyse du cycle de vie d'ampoules électriques. Deux études ont tout de même été répertoriées, soient celles de Pfeifer (1996), rapportée par Bio Intelligence Service (2003), et de Parsons (2006). Celles-ci font ressortir la supériorité des ampoules fluocompactes relativement aux incandescentes selon un facteur de 4 à 5.

L'étude de Pfeifer apporte une quantité limitée d'information puisqu'elle ne considère que l'étape d'utilisation. De plus, elle ne s'avère potentiellement pas représentative sur le plan des technologies. Ces dernières ont en effet beaucoup évoluées depuis la publication de l'étude il y a plus de 10 ans (par ex. : l'efficacité énergétique et la taille du ballast se sont améliorées et la taille des ampoules et la quantité de mercure ont diminuées).

L'étude de Parsons considère, quant à elle, toutes les étapes du cycle de vie de l'ampoule et est plutôt représentative du contexte technologique actuel. L'auteur conclut que les ampoules fluorescentes sont significativement meilleures d'un point de vue environnemental. L'étude représente toutefois la situation australienne, laquelle diffère de la situation québécoise notamment en ce qui a trait au mélange du réseau électrique

(l'auteur a présumé 100 % de production au charbon alors qu'au Québec, la production est d'origine hydraulique à plus de 90 %). Cet élément semblait d'autant plus important considérant que la consommation électrique durant l'utilisation constitue, à la lumière des divers résultats obtenus à ce jour, le contributeur principal à l'impact du cycle de vie de l'ampoule.

Aucune de ces études ne tient par ailleurs compte de :

- La chaleur « coproduite » avec la lumière durant l'utilisation des ampoules, et contribuant au chauffage des bâtiments. Encore une fois, cet aspect semble important dans un contexte québécois, considérant que les ampoules incandescentes génèrent, pour une même quantité de lumière fournie, davantage de chaleur que les ampoules fluocompactes.
- La valorisation possible des ampoules en fin de vie.

Enfin, bien que Parsons corrobore les résultats d'une étude de l'agence de protection environnementale américaine (<http://www.nema.org/lamprecycle/epafactsheet-cfl.pdf>), celles-ci ne sont pas adaptées à la situation au Québec. Elles concluent toutes deux quant au faible impact du mercure des ampoules fluocompactes comparativement à celui relié à la production du charbon nécessaire à la production de l'électricité consommée pendant l'utilisation.

Les conclusions de ces études devaient donc être vérifiées à l'aide d'une ACV :

1. Adaptée à la réalité québécoise, en termes de représentativité des données (en particulier en ce qui a trait au mode de production de l'électricité) et des modèles d'évaluation des impacts du cycle de vie ;
2. Considérant la chaleur générée par les ampoules, de même que divers scénarios relatifs au taux de récupération des fluocompactes et de réutilisation des matériaux et du mercure en fin de vie.

Le Tableau 2-2 résume les principaux paramètres et conclusions des deux études répertoriées.

Tableau 2-2 : Principaux paramètres et conclusions des études répertoriées

Paramètre	Parsons (2006)	Pfeifer (1996), rapporté par BIO Intelligence Service (2003)
Fonction	Éclairer	Éclairer
Unité fonctionnelle	Fournir une quantité équivalente de lumens pendant 8 000 heures	10 millions lumen-heures
Flux de référence	Incandescente : 4 ampoules de 100 W de 2 000 heures	Incandescente : 15,4 ampoules de 60 W de 1 000 heures
	Fluocompacte (FC) : 1 ampoule de 18 W de 8 000 heures	FC#1 : 2,1 ampoule de 15 W (600 lm) de 8 000 heures FC#2 : 1,9 ampoule de 13 W (650 lm) de 8 000 heures FC#3 : 2,1 ampoule de 11 W (600 lm) de 8 000 heures
Étapes du cycle de vie considérées		
Règle d'imputation	Aucune mention	Aucune mention
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> Les fluocompactes sont fabriquées en Chine; les incandescentes en Indonésie. Une incandescente de 100 W est équivalente à une fluocompacte de 18 W en termes de lumens. La consommation d'énergie chez le grossiste et le détaillant imputable aux fluocompactes est de 0,05 % (par rapport à la consommation totale) et de 0,002 % pour les incandescentes (basée sur la valeur économiques des deux produits). Les pertes sur le réseau électrique (transport et distribution) sont de 2 % de la consommation totale. On tient compte du faible facteur de puissance (<i>low power factor</i>) des fluocompactes. Ce facteur est de 0,01 % de la consommation totale et des pertes est sur le réseau. Les deux types d'ampoules se retrouvent en décharge en fin de vie. La fluocompacte contient 5 mg de mercure sous forme gazeuse. Le ratio de l'argon relativement au mercure dans la fluocompactes est de 1 pour 500 (en termes de pression). L'impact du cycle de vie de l'indium contenu dans les fluocompactes est négligeable. Le scellant utilisé dans les deux types d'ampoules est à base de phénol-formaldéhyde. Le phosphore n'a pas d'impact significatif dans l'environnement. Les ampoules parcourent 700 km du port d'arrivée aux principales villes et 120 km du point de rejet (<i>disposal point</i>) à la mise en décharge. 	Aucune mention
Électricité étape d'utilisation	100 % à partir du charbon	17,4 % charbon + 7,4 % gaz + 16,4 % hydraulique + 7,8 % lignite + 40,3 % nucléaire + 10,7 % mazout
Sources des données	<ul style="list-style-type: none"> Les données concernant la consommation électriques, le facteur de puissance, la distorsion harmonique et les circuits électroniques proviennent de l'<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (IEEE) et autres institutions reconnues. Les données sur les matériaux (masse et type) proviennent des laboratoires de Parsons, D. Les spécifications techniques proviennent des fabricants. 	Aucune mention
Méthode d'ÉICV	CML 2. Baseline 2001 Australian Toxicity Factors V1.00 Eco Indicator 99 E Australian Substances V2.01	Aucune mention

Tableau 2-2 : Principaux paramètres et conclusions des études répertoriées

Paramètre	Parsons (2006)	Pfeifer (1996), rapporté par BIO Intelligence Service (2003)
Principales conclusions	<ul style="list-style-type: none"> • Les fluocompactes sont clairement supérieures aux incandescentes en termes de performances environnementales parce qu'elles sont efficaces énergétiquement (et donc, l'étape d'utilisation domine l'impact du cycle de vie des ampoules). • L'impact du mercure contenu dans les fluocompactes ne constitue pas un problème majeur lorsqu'on le compare aux autres impacts environnementaux ou à la quantité de mercure émise par la centrale au charbon (fournissant l'électricité pendant la phase d'utilisation). Même constat pour le plomb contenu dans la soudure pour les deux types d'ampoules. • Le ballast électronique a un impact environnemental significatif dû au matériel et à l'énergie utilisée pour sa fabrication. • Le faible facteur de puissance et le niveau élevé de distorsion harmonique des fluocompactes ont un impact potentiel sur le système d'alimentation électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les fluocompactes sont clairement supérieures aux incandescentes. Le facteur qui défavorise les incandescentes est l'énergie primaire consommée pendant l'utilisation (représentant 95 % de toute l'énergie primaire consommée sur le cycle de vie complet, l'étape de fabrication en consommant environ 5 %). • Les quantités de mercure émises sur le cycle de vie des incandescentes et des fluocompactes sont équivalentes.

3. MODÈLE D'ÉTUDE

Dans les sections qui suivent la première phase de l'ACV, à savoir la définition des objectifs et du champ de l'étude, est décrite en suivant la norme ISO. Ce chapitre présente ainsi le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV.

3.1 Objectifs de l'étude

3.1.1 *But de l'étude*

Cette étude avait pour objectif d'évaluer et de comparer l'ampoule incandescente et l'ampoule fluocompacte de substitution. De manière plus spécifique, les objectifs étaient :

1. D'établir le profil environnemental du cycle de vie des deux types d'ampoules, c.-à-d. en documenter la consommation de matières et d'énergie et les rejets à l'environnement et évaluer l'impact potentiel associé à cette consommation et à ces rejets ;
2. D'identifier les « points chauds » (p. ex. : l'utilisation et la gestion en fin de vie) et les paramètres environnementaux clés (p. ex. : la consommation d'électricité et l'émission de mercure) du cycle de vie des deux alternatives ;
3. De comparer les deux systèmes sur la base d'une analyse de scénarios, de manière à pouvoir cibler les forces et les faiblesses de chacun et identifier les conditions pour lesquelles une alternative semble préférable à l'autre :
 - Le **scénario de base** néglige la chaleur émise pendant l'éclairage en tant que coproduit, c.-à-d. qu'il ne considère pas ses effets potentiels sur les systèmes de chauffage et de climatisation des habitations.
 - Le **scénario « effet croisé »** considère quant à lui l'effet de la chaleur dégagée par les ampoules à l'intérieur des habitations. Il est à noter que ce scénario a été développé en sous-scénarios, de manière à représenter divers contextes québécois typiques.

Il est aussi à noter que les **scénarios de fin de vie** initialement proposés n'ont pas été réalisés dans le cadre de ce projet. Ce choix est justifié à la sous-section 5.2.2.

3.1.2 *Application envisagée*

L'étude visait à permettre à Hydro-Québec d'améliorer sa compréhension des impacts environnementaux associés au cycle de vie des deux types d'ampoules utilisées dans un contexte québécois, et à lui fournir des éléments de réponse quant à la substitution des ampoules incandescentes par des fluocompactes.

3.1.3 *Public concerné*

Les résultats de l'étude comparative sont destinés à un usage interne par Hydro-Québec et à des fins de divulgation publique. Comme ils appuieront des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public, ces résultats ont fait l'objet d'une revue critique par un comité de parties intéressées (voir sous-section 3.2.8).

3.2 **Champ de l'étude**

3.2.1 *Fonctions, unité fonctionnelle et flux de référence*

L'ACV porte non pas sur un produit, mais sur une ou plusieurs fonctions remplies par ce produit. L'analyse vise donc la quantité de produits requise pour remplir la fonction étudiée, ce qui assure la comparabilité d'options alternatives ayant des performances différentes. L'unité fonctionnelle représente quant à elle la quantification de la fonction étudiée, tandis que les flux de référence permettent de relier la performance d'un système à l'unité fonctionnelle (c.-à-d. qu'ils représentent la quantité de produit requise afin de remplir la fonction exprimée par l'unité fonctionnelle).

Les paragraphes qui suivent précisent la fonction étudiée, l'unité fonctionnelle et les flux de référence pour le cas à l'étude.

3.2.1.1 Fonctions

La fonction principale des systèmes de produits étudiés est la suivante :

« *Éclairer (fournir une quantité de lumière) pendant une période donnée* ».

Ces systèmes présentent toutefois un caractère multifonctionnel puisqu'ils : 1) émettent une certaine quantité de chaleur potentiellement valorisable pendant l'utilisation ; et 2) possèdent d'autres fonctions secondaires, notamment celles d'apporter une ambiance agréable et de fournir une qualité de lumière permettant de diminuer les symptômes associés à la dépression saisonnière.

Ces fonctions secondaires doivent aussi être prises en compte, de manière à assurer l'équivalence fonctionnelle des deux systèmes comparés. Toutefois, il est à noter que :

- Pour des raisons de faisabilité et de simplicité, seule la chaleur générée est ici prise en compte, les autres fonctions secondaires étant a priori négligées. L'impact du cycle de vie des ampoules est ainsi entièrement attribué à la lumière et à la chaleur. Cette hypothèse semble raisonnable étant donnée la faible contribution présumée des autres fonctions secondaires à l'impact total, ainsi que l'équivalence supposée, notamment en terme de qualité de la lumière fournie, des deux types d'ampoules comparés (voir section 2.1).
- La chaleur générée constitue une fonction uniquement si elle peut être considérée comme un coproduit (plus particulièrement comme un sous-produit « valorisé ») et donc, comme une ressource consommée permettant de réduire les besoins en chauffage. Au contraire, si la chaleur générée entraîne un besoin de climatisation, celle-ci doit être considérée comme un « déchet » à traiter.

Le traitement de cette fonction secondaire est présenté à la sous-section 3.2.3.

3.2.1.2 Unité fonctionnelle

La quantification de la fonction étudiée est basée sur une quantité de lumens fournie pendant une période donnée. L'unité fonctionnelle choisie se définit comme suit :

« Fournir entre 500 et 900 lumens pendant 10 000 heures »

L'intervalle, plutôt qu'une valeur précise, pour la quantification de la lumière fournie vise à ne pas s'éloigner de l'application envisagée, soit de pouvoir suggérer aux clients d'Hydro-Québec le remplacement des ampoules à incandescence par des ampoules fluocompactes (sur la base de leur performance environnementale). Il s'agit donc de refléter l'acte de remplacer une ampoule incandescente de 60 W par son équivalent fluocompacte disponible sur le marché, et on suppose que le consommateur ne perçoit pas une différence de quelques centaines de lumens.

3.2.1.3 Flux de référence

Les flux de référence pour cette étude correspondent à la quantité d'ampoules requises afin de fournir entre 500 et 900 lumens pendant 10 000 heures. Ils sont les suivants :

- Système A : 1 ampoule fluocompacte 13 ou 15 W (durée de vie : 10 000 heures) ;
- Système B : 10 ampoules incandescentes 60 W (durée de vie : 1 000 heures).

Les flux de référence peuvent aussi comprendre l'électricité totale requise à l'utilisation de chacune de ces ampoules (durant leur vie utile).

3.2.2 Frontières et description des systèmes de produits

Les frontières des systèmes identifient les étapes, processus et flux considérés dans l'ACV. Elles devraient inclure : 1) toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée ; et 2) tous les processus et flux contribuant de manière significative à l'impact environnemental potentiel.

Les paragraphes suivants présentent une description générale des systèmes étudiés et précisent les processus et flux initialement inclus et exclus, ainsi que les frontières temporelles et géographiques. Il est à noter que ces frontières initiales ont été précisées et révisées suite la collecte des données d'inventaire (tel que présenté au chapitre 4).

3.2.2.1 Description générale des systèmes

La Figure 3-1 schématise les frontières des deux systèmes de produits étudiés. Rappelons :

- Qu'il s'agit d'une analyse comparative complète de type « *cradle-to-grave* », c.-à-d. comprenant chacune des étapes du cycle de vie des ampoules ;
- Que les fonctions secondaires sont négligées, à l'exception de la chaleur générée durant l'hiver.

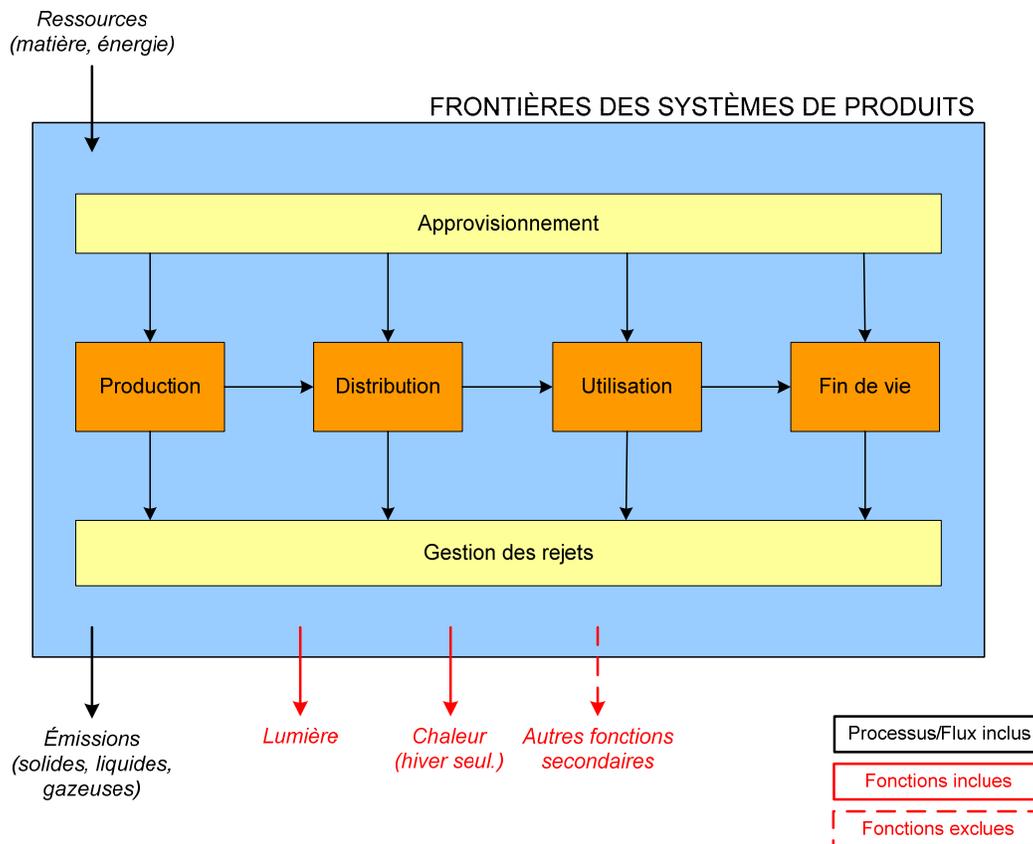


Figure 3-1 : Frontières des systèmes à l'étude.

Les paragraphes suivants précisent quant à eux les principaux processus impliqués dans ces systèmes (une description plus détaillée des systèmes est présentée au chapitre 4).

Le sous-système « **production** » vise les différentes étapes ayant lieu aux sites de fabrication et d'emballage des deux types d'ampoules. Il correspond donc à l'opération des équipements et infrastructures dédiés à cette production.

Le sous-système « **distribution** » correspond aux divers transports des produits finis entre les sites de production et les centres de distribution (détaillants). Il inclut également la manutention et l'entreposage des produits chez les détaillants (de même que chez les grossistes ou autres intermédiaires, s'il y a lieu).

Les sous-systèmes « **utilisation** » et « **fin de vie** » concernent, quant à eux, l'utilisation et l'élimination des ampoules en fin de vie, incluant les transports impliqués entre les détaillants et les utilisateurs, et entre les utilisateurs et les lieux de gestion respectivement.

Enfin, les sous-systèmes « **Approvisionnement** » et « **Gestion des rejets** » concernent respectivement, pour chacun des quatre sous-systèmes précédents, toutes les activités reliées :

- À l'approvisionnement en ressources (eau, énergie, produits chimiques, matériaux), comprenant l'extraction, le traitement et la transformation des ressources naturelles, de même que les différents transports requis jusqu'à l'arrivée aux sites d'utilisation des ressources (c.-à-d. aux sites de production, de distribution, d'utilisation et de gestion en fin de vie des ampoules).
- Au transport et au traitement des déchets générés à l'une ou l'autre de ces étapes du cycle de vie des ampoules, en tenant compte des mises en valeur possibles (réutilisation, recyclage, valorisation énergétique ou autres).

3.2.2.2 Processus et flux initialement inclus et exclus et critères d'inclusion

Lors de la réalisation d'une ACV, il n'est pas nécessaire de quantifier les entrants et les sortants qui ne changeront pas de façon significative les conclusions globales de l'étude. Ainsi, conformément aux lignes directrices proposées par la SETAC (1997) et l'ISO 14 044 (2006) :

- Les activités humaines, ainsi que la construction, la maintenance (entretien et réparation) et le démantèlement des biens-capitaux peuvent normalement être exclus des frontières des systèmes. Il est à noter, toutefois, que certaines banques ACV commerciales, notamment la banque *ecoinvent* (<http://www.ecoinvent.ch/>), incluent de façon sommaire les biens-capitaux, et parviennent à montrer par le fait même que ces processus secondaires ne sont pas toujours négligeables. Ceux-ci devaient donc être considérés dans la mesure du possible. Pour la présente étude, aucune donnée relative à la construction, la maintenance et le démantèlement des biens-capitaux, aux déplacements quotidiens des employés, aux voyages d'affaires ou autres activités des producteurs n'est toutefois intégrée au modèle. Ce dernier considère uniquement les processus associés à la construction, la maintenance et le démantèlement des biens-capitaux qui sont compris dans les modules *ecoinvent* ;
- L'identification et la sélection initiale des processus impliqués dans le système étudié sont a priori basées sur l'information et les données (primaires et secondaires) disponibles et relativement faciles d'accès ;
- Suite à une première phase de collecte, des critères physiques d'inclusion (contribution massique ou énergétique) peuvent être employés, de manière à évaluer l'influence potentielle des données manquantes sur les résultats ou encore, à concentrer les efforts d'évaluation et d'interprétation sur les éléments contribuant de façon sensible aux impacts environnementaux. Ces critères physiques d'inclusion peuvent être fixés à un certain pourcentage de l'inventaire total (1 %, par exemple), mais ne doivent pas être appliqués aux entrants et sortants présentant un impact environnemental reconnu, c.-à-d. que la substance doit être conservée dans l'inventaire peu importe sa quantité (étant donné sa pertinence environnementale). Pour la présente étude, aucun flux élémentaire n'a cependant été exclu selon ces critères. Ainsi, toutes les données primaires (spécifiques à l'étude et obtenues d'Hydro-Québec et des manufacturiers d'ampoules) et secondaires (provenant d'une banque de données générique) ont été considérées dans l'inventaire, peu importe les quantités physiques qu'elles représentaient.

Le Tableau 3-1 résume les processus initialement inclus dans les frontières du système.

Tableau 3-1 : Processus initialement inclus dans l'ACV des deux types d'ampoules (scénario de base)

Étape du cycle de vie	Sous-étapes/Processus
Production	1. Assemblage et emballage
Distribution	1. Transports
	1. Entre les sites de production et les ports d'expédition (camion)
	2. Intercontinental (bateau)
	3. Entre le port d'arrivée et le(s) centre(s) de réception/expédition (train)
	4. Entre le(s) centre(s) de réception/expédition et les détaillants (camion)
	2. Manutention et entreposage
Utilisation	1. Transport entre les sites de distribution et les lieux d'utilisation
	2. Utilisation (10 000 heures)
Fin de vie	1. Transport entre les lieux d'utilisation et les sites d'enfouissement
	2. Enfouissement
Approvisionnement	1. Production et transport des ressources requises à la production, la distribution, l'utilisation et la fin de vie des ampoules
	1. Matières premières (matériaux et composantes) de l'ampoule
	2. Matériaux d'emballage
	3. Électricité et combustibles
	4. Autres ressources matérielles consommées (en fin de vie, par ex.)
Gestion des rejets	1. Transport et gestion des rejets générés au cours de la production, de la distribution, de l'utilisation et de la fin de vie des ampoules
	1. Déchets de production
	2. Déchets d'emballage
	3. Autres déchets générés

3.2.2.3 Frontières géographiques

Les frontières géographiques concernent différents aspects en ACV puisque :

- Les ressources impliquées peuvent provenir de différentes régions du monde ;
- Les infrastructures, telles que les systèmes de transport, de production d'énergie (le réseau électrique, par exemple) et de gestion des déchets, diffèrent selon les régions ;
- La sensibilité de l'environnement aux différents polluants varie d'une zone géographique à l'autre.

Ainsi, la présente étude vise la distribution, l'utilisation et la gestion en fin de vie, au Québec, d'ampoules produites en Chine. Les processus associés à l'approvisionnement en énergie et en matières premières, ainsi qu'à la gestion des rejets générés à l'une ou l'autre de ces étapes, peuvent quant à eux avoir lieu n'importe où dans le monde.

3.2.2.4 Frontières temporelles

Les frontières temporelles d'une ACV concernent :

- La période définie par l'unité fonctionnelle considérant les périodes de production, de distribution, d'utilisation (durée de vie) et de gestion en fin de vie des produits ;
- La période d'effet des substances inventoriées.

Pour le cas à l'étude, la période définie par l'unité fonctionnelle correspond à 10 000 heures d'éclairage. Ainsi, les frontières temporelles sont définies par les périodes de production et de distribution du nombre d'ampoules requises pour fournir ces heures d'éclairage, d'utilisation des ampoules pendant leur vie utile et de gestion en fin de vie. Il est à noter que :

- Certains processus compris dans ces frontières peuvent générer des émissions sur une plus longue période. Par exemple, l'enfouissement des déchets engendre des émissions (biogaz et lixiviats) sur une période de temps dont la longueur (de quelques décennies à plus d'un siècle, voir des millénaires) dépend de la conception et des paramètres d'opération des cellules d'enfouissement et de la modélisation de leurs émissions dans l'environnement.
- L'année de référence choisie est 2006. L'étude constitue ainsi une ACV statique représentative de la situation en 2006.

L'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) des substances inventoriées doit en principe être considérée sur une période de temps infinie, c.-à-d. qu'elle doit considérer l'étendue complète de la persistance et de l'effet de ces substances dans l'environnement. Toutefois, des choix de modélisation différents peuvent être justifiables pour réduire l'incertitude des résultats. C'est le cas de l'effet potentiel des émissions de gaz à effet de serre, qui peut être quantifié sur une période de 20, 100 ou 500 ans, tandis qu'une période de temps infinie est normalement utilisée pour quantifier l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, les effets toxiques et écotoxiques, etc. Les modèles et hypothèses employés pour l'ÉICV sont présentés à la sous-section 3.2.6 et à l'Annexe B.

3.2.3 Approche d'imputation

Comme mentionné, l'utilisation des ampoules génère de la chaleur pouvant être valorisée (voir paragraphe 3.2.1.1). Cette chaleur est considérée selon deux scénarios distincts :

1. La chaleur générée par l'ampoule est un **coproduit** (fonction secondaire) lorsqu'elle peut être associée à une diminution des besoins en chauffage (électrique ou autre). Elle est alors prise en compte en « créditant » au cycle de vie de l'ampoule, l'impact évité d'une production équivalente de chaleur par un système de chauffage. Un tel « crédit » assure une certaine équivalence fonctionnelle entre les deux systèmes comparés, tout en permettant une attribution plus juste de l'impact des ampoules à la fonction étudiée (c.-à-d. de générer de la lumière).
2. La chaleur générée par l'ampoule est un **déchet** à traiter lorsqu'elle peut être associée à une augmentation des besoins en climatisation. Elle doit alors être prise en compte en ajoutant au cycle de vie de l'ampoule, l'impact associé à un processus supplémentaire de traitement (climatisation).

3.2.4 Hypothèses générales

Cette sous-section présente les hypothèses générales relatives au cycle de vie, de même qu'aux caractéristiques et paramètres techniques des ampoules.

3.2.4.1 Cycle de vie des ampoules utilisées au Québec, en 2006

- Sylvania, Philips et Globe sont les principaux manufacturiers d'ampoules fluocompactes et incandescentes.
- Les deux types d'ampoules sont fabriqués en Chine.

- Les spécifications fournies par les manufacturiers sont représentatives des ampoules (réellement) utilisées.
- Les fonctions secondaires sont négligeables, à l'exception de la chaleur générée durant l'hiver.
- Les ampoules sont enfouies en fin de vie. Le mercure contenu dans les fluocompactes est alors entièrement émis à l'air.

3.2.4.2 Caractéristiques et paramètres techniques

- Une ampoule incandescente de 60 W est équivalente, en termes de quantité de lumière fournie, à une ampoule fluocompacte de 13 ou 15 W. Ainsi, bien que le flux lumineux varie grandement entre les divers types et modèles d'ampoules (voir Tableau 2-1), il est, en pratique, considéré équivalent pour ces deux types d'ampoules.
- Une ampoule incandescente de 60 W a une durée de vie de 1 000 heures ; une ampoule fluocompacte de 13 ou 15 W a une durée de vie de 10 000 heures.
- Environ 90 % de l'énergie consommée par les deux types d'ampoule est ultimement transmise à l'air ambiant (95 % de l'énergie consommée est dissipée en chaleur et 95 % de la chaleur dissipée est transmise à l'air ambiant).
- Le faible facteur de puissance de la fluocompacte est négligé, bien qu'il puisse en augmenter la consommation énergétique de 5 à 7 % (Olivier, 2007).
- La décroissance des lumens dans le temps, dans le cas des fluocompactes, est négligée. Cette décroissance n'affecterait cependant ni la durée de vie, ni la consommation électrique pendant la vie utile de l'ampoule.

3.2.5 Données d'inventaire du cycle de vie (ICV)

Cette sous-section présente un aperçu des sources de données qui seront privilégiées, ainsi que les exigences relatives à la qualité des données qui seront employées. Ces exigences permettront d'orienter le processus de collecte et de valider les données utilisées.

3.2.5.1 Sources de données

Cette ACV a pour but de fournir des données environnementales quant au cycle de vie de deux types d'ampoules utilisées au Québec. Elle a donc été réalisée de manière à privilégier les **données primaires** disponibles, c.-à-d. les données spécifiques d'un échantillon de modèles supposés représentatifs de ces deux types d'ampoules. Ces données primaires ont essentiellement été collectées auprès de divers manufacturiers présents sur le marché québécois des ampoules.

Les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles ont été complétées par des hypothèses et des **données secondaires**, c.-à-d. des données génériques ou théoriques disponibles dans la littérature et les banques de données internationales en ACV. Étant donné le nombre de sous-systèmes normalement impliqués dans le cycle de vie des produits et services, il existe en effet un équilibre entre l'effort pour obtenir une donnée primaire et l'amélioration de la qualité de l'étude.

Parmi les données secondaires disponibles, quelques banques de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) sont reconnues par la communauté scientifique internationale, plus particulièrement la banque d'origine européenne *ecoinvent* (<http://www.ecoinvent.ch/>). Cette dernière est effectivement la plus complète des banques ICV disponibles à ce jour et surpasse de loin les autres banques commerciales tant du point de vue quantitatif (nombre de processus inclus) que qualitatif (qualité des procédés de validation, complétude des données, etc.).

3.2.5.2 Exigences relatives à la qualité des données

La fiabilité des résultats et des conclusions de l'ACV dépend de la qualité des données d'inventaire qui sont utilisées. Il est donc important de s'assurer que ces données respectent certaines exigences spécifiées en accord avec l'objectif de l'étude.

Selon la norme ISO, les exigences relatives à la qualité des données devraient au minimum en assurer la **validité**, ce qui est équivalent ici à leur représentativité quant à l'âge, la provenance géographique et la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devaient être représentatives :

- De la période définie par les frontières temporelles, soit l'année 2006 (voir paragraphe 3.2.2.4) ;
- Du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude (voir paragraphe 3.2.2.3) ;
- Des caractéristiques technologiques de(s) processus élémentaire(s) qu'elles décrivent.

Il est à noter que les banques de données ICV disponibles à ce jour sont plus ou moins représentatives du contexte actuel dans lequel s'inscrivent les systèmes étudiés. Ces banques présentent en effet des moyennes technologiques représentatives du contexte européen pour la plupart. Elles peuvent cependant être adaptées, dans la mesure où les données qu'elles contiennent sont suffisamment désagrégées et que l'information disponible le permet. Par exemple, certaines données européennes relatives à la production ou à la transformation de différents matériaux font référence à d'autres données (pour la production de l'énergie requise par exemple). Ces dernières peuvent alors être remplacées par une donnée de production d'énergie plus spécifique au contexte à l'étude, augmentant ainsi la représentativité géographique des données européennes disponibles pour la production ou la transformation de matériaux.

Ainsi, bien que la majeure partie des modules de données génériques employés dans le cadre de cette étude ait été tirée directement de la banque *ecoinvent*, plusieurs de ces modules ont été adaptés de manière à augmenter leur représentativité des produits et du contexte analysés. Plus particulièrement, pour toutes les activités ayant lieu au Québec (étapes de distribution, d'utilisation et de gestion en fin de vie), les modules *ecoinvent* ont été adaptés en remplaçant les mélanges d'approvisionnement en énergie des réseaux électriques (*grid mix*) européens par :

- Le *grid mix* québécois pour les processus d'avant-plan, c.-à-d. les processus directement liés aux systèmes étudiés (par ex. : la consommation d'électricité pendant l'utilisation et la gestion des ampoules en fin de vie) ;
- Le *grid mix* nord-américain pour les processus d'arrière-plan, c.-à-d. tous les processus directement et indirectement liés aux processus d'avant-plan (par ex. :

toutes les ressources consommées pour la production de l'électricité nécessaire durant l'utilisation et la gestion des ampoules en fin de vie). Le *grid mix* nord-américain est ici plus approprié considérant que l'approvisionnement, et la gestion des générés aux diverses étapes du cycle de vie, ne s'effectuent pas seulement au Québec.

Ainsi, tous les processus d'avant-plan ayant lieu au Québec (incluant les divers transports) font appel à des processus d'arrière-plan adaptés au contexte énergétique nord-américain.

En ce qui a trait à la production, comme elle s'effectue en Chine, que les processus d'approvisionnement associés ne sont pas connus précisément et qu'ils sont possiblement intégrés au marché mondial, les modules européens ont été employés tels quels, sans modification des mélanges énergétiques. La consommation (estimée) d'électricité sur les sites de production des ampoules a quant à elle été modélisée sur la base du *grid mix* chinois (tel que présenté par l'agence internationale de l'énergie), lui-même modélisé sur la base de modules européens (non adaptés).

Enfin, bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par l'ISO concernant la **complétude** et la **précision** des données, les recommandations suivantes devaient être considérées :

- Les données devaient être collectées de manière à ce qu'elles soient les moins agrégées possible (agrégations par types de technologies ou par secteurs à éviter).
- Les données devaient être documentées (métadonnées) conformément aux meilleures pratiques disponibles.

L'application de ces recommandations permettra éventuellement l'évaluation de la complétude et de la précision des données utilisées en ACV.

3.2.6 Évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV)

Il était initialement proposé de réaliser l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) sur la base de la méthode canadienne LUCAS (Toffoletto *et al.*, 2005). Or, les données d'inventaire associées à la production des composantes électroniques de l'ampoule fluocompacte n'étaient pas autrement disponibles que par l'entremise de l'Empa (www.empa.ch) et seuls les flux caractérisés et agrégés en catégories d'impacts selon la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.*, 2003) ont été obtenus de cette source.

Il a donc été décidé d'établir l'ÉICV sur cette dernière méthode internationalement reconnue et de vérifier si l'utilisation de LUCAS entraîne des variations sur les résultats. Le Tableau 3-2 présente les catégories d'impacts considérées par chacune des deux méthodes. Ces catégories d'impacts sont présentées en détail à l'Annexe B.

Notons de plus que la méthode LUCAS est actuellement limitée à l'étape de caractérisation, c.-à-d. à la conversion et l'agrégation des résultats d'inventaire selon leur contribution à chacune des catégories d'impacts. Ainsi, contrairement à IMPACT 2002+, LUCAS ne propose aucun facteur de conversion en dommages des résultats caractérisés. Bien que la conversion des impacts en dommages introduise une incertitude supplémentaire, l'analyse de 4 catégories de dommage, relativement à plus de 10 catégories d'impact, possède l'avantage de simplifier l'interprétation des résultats.

Notons aussi que ces catégories ne couvrent pas tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines (p. ex. bruit, odeurs, rayonnement, champ électromagnétique).

Tableau 3-2 : Correspondances entre les catégories de dommage et les catégories d'impact des méthodes IMPACT 2002+ et LUCAS

IMPACT 2002+		LUCAS
Catégorie de dommage	Catégorie d'impact	Catégorie d'impact
Santé humaine (SH)	Effets cancérogènes	Effets cancérogènes
	Effets non-cancérogènes	Effets non-cancérogènes
	Effets respiratoires dus aux substances inorganiques	Aucune
	Radiations ionisantes	
	Détérioration de la couche d'ozone	Appauvrissement de la couche d'ozone
	Oxydation photochimique	Smog photochimique
Qualité des écosystèmes (QE)	Écotoxicité aquatique	Écotoxicité aquatique
	Écotoxicité terrestre	Écotoxicité terrestre
	Acidification/eutrophisation terrestre	Eutrophisation terrestre
	Occupation des terres	Aucune
Changement climatique (CC)	Réchauffement global	Réchauffement global
Ressources (R)	Énergies non renouvelables	Combustibles fossiles
	Extraction minière	Extraction minière
Aucun lien avec une catégorie de dommage	Acidification aquatique	Acidification aquatique
	Eutrophisation aquatique	Eutrophisation aquatique

3.2.7 Méthode de calcul

Lorsque l'ensemble des données requises est obtenu et que les flux associés sont normalisés par rapport à l'unité fonctionnelle choisie, il est possible de modéliser les systèmes de produits à l'aide d'un logiciel ACV commercial. Le logiciel utilisé pour faire le calcul de l'inventaire et l'évaluation des impacts environnementaux potentiels associés aux émissions inventoriées est le logiciel SimaPro, développé par Pré Consultants (www.pre.nl).

3.2.8 Revue critique

La revue critique est une procédure utilisée afin de vérifier si l'ACV satisfait aux normes internationales. De manière générale, les revues critiques d'ACV sont facultatives, sauf lors d'affirmations comparatives divulguées au public. Une ACV réalisée dans le but de supporter une comparaison destinée à des fins publiques nécessite effectivement une attention particulière, étant donné les risques associés à une mauvaise interprétation de ses résultats par les diverses parties prenantes. Les revues critiques augmentent de plus la crédibilité de l'analyse.

La présente étude étant destinée à des fins de divulgation publiques, une revue critique a été réalisée par un comité d'experts ayant les compétences pour valider les hypothèses, données et procédures utilisées pour réaliser l'étude. Ce comité était composé de :

- Pascal Lesage, ing jr, Ph. D., consultant de la société de conseil en ACV Sylvatica, agissant comme président du comité de revue ;
- Sylvain Lavigne, ing., GE Canada Éclairage, agissant comme représentant de l'industrie ;
- Gilles Meunier, ing., Efficacité énergétique et services d'Hydro-Québec, agissant comme spécialiste en utilisation de l'énergie ;
- Sylvain St-Amour, OSRAM SYLVANIA, agissant comme représentant de l'industrie.

De façon plus informelle, l'opinion experte de Bret Hamilton de la *Vermont Energy Investment Corporation* a aussi été retenue.

Conformément à ISO 14 040, les objectifs de la revue critique étaient d'assurer que :

- Les méthodes employées pour réaliser l'ACV sont cohérentes avec les normes ISO 14 040 et 14 044 ;
- Les méthodes employées pour réaliser l'ACV sont valables d'un point de vue scientifique et technique ;
- Les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport à l'objectif de l'étude ;
- L'interprétation des résultats reflète les limitations identifiées et l'objectif de l'étude ; et
- Le rapport d'étude est transparent et cohérent.

En plus de ces objectifs, la revue critique comprend une vérification approfondie de certains résultats clés et de la modélisation du système de produits effectuée avec le logiciel ACV SimaPro. Les résultats de la revue (commentaires et questions du comité de revue et réponses du CIRAIG) sont présentés en Annexe D.

3.2.9 Applications et limites de l'ACV

Cette étude vise à améliorer la compréhension d'Hydro-Québec des impacts environnementaux reliés au cycle de vie de deux types d'ampoules employées au Québec. D'autres types et/ou modèles d'ampoules utilisées sur le marché canadien pourraient éventuellement être intégrés au modèle d'étude de manière à fournir une meilleure représentativité de la technologie fluocompacte et d'étendre les conclusions au contexte canadien. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent donc être évitées.

Les résultats de la présente ACV peuvent être utilisés pour :

- Identifier les aspects environnementaux significatifs associés aux deux types d'ampoules employées au Québec ;
- Cibler les forces et les faiblesses de chacune des alternatives selon différents scénarios, de manière à pouvoir identifier les conditions pour lesquelles une alternative semble préférable à l'autre.

Les principales limites pouvant toutefois être soulevées relativement aux conclusions obtenues concernent :

- L'applicabilité des diverses hypothèses relatives au cycle de vie des ampoules utilisées au Québec, en 2006 ;
- La complétude et la validité des données d'inventaire étant donné :
 - Le risque d'omission de flux significatifs dû au manque de données, considérant que les frontières du système sont fixées sur la base des informations fournies par les manufacturiers et des données génériques disponibles ;
 - La validité des données utilisées, considérant la qualité de l'échantillon de données primaires collectées (petit échantillon présentant de grandes variations) et la représentativité temporelle, géographique et technologique des données génériques utilisées.
- La complétude et la validité des méthodes ÉICV, en particulier parce qu'elles ne couvrent pas toutes les substances contribuant aux diverses catégories d'impact, ni tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines (p. ex. bruit, odeurs, rayonnement, champ électromagnétique).
- L'évaluation quantitative des conséquences possibles de privilégier un type d'ampoule plutôt qu'un autre (dans le but d'appuyer une éventuelle décision). La présente étude ne couvrant effectivement pas les conséquences d'une pénétration importante des fluocompactes à l'échelle québécoise, ses conclusions ne fournissent qu'une partie des éléments de réponse devant être considérés dans le processus décisionnel.

La sensibilité des résultats et conclusions à la plupart de ces limites est évaluée au chapitre 5.3 de ce rapport.

Enfin, il est à noter que les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels. Ils n'expriment par ailleurs pas le risque individuel notamment associé à une exposition suite à un bris accidentel d'ampoules fluocompactes dans un environnement clos, ni l'influence de certains paramètres plus ou moins importants du point de vue de l'utilisateur (p. ex : interférence avec dispositifs infrarouge, température de fonctionnement (min-max), utilisation avec gradateurs et phénomènes de distorsion harmonique).

4. ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE (AICV)

Ce chapitre présente la deuxième phase de l'ACV : l'analyse de l'inventaire. Il expose la méthodologie de collecte et les sources de données employées, le détail des systèmes de produits et des hypothèses utilisées, ainsi qu'une analyse des résultats d'inventaire pour chaque type d'ampoule.

4.1 Méthodologie de collecte et sources des données

Les **données primaires** ont essentiellement été collectées auprès de divers manufacturiers présents sur le marché québécois des ampoules. Le processus de collecte a été assuré par l'entremise d'un questionnaire (transmis par voies électroniques) et de discussions téléphoniques. Les informations demandées visaient à obtenir les spécifications techniques, la liste des matériaux, ainsi qu'un portrait des étapes de fabrication et de distribution de leur modèle le plus vendu des deux types d'ampoules à l'étude. Les informations fournies sont présentées en détail à l'Annexe C. La personne impliquée dans la collecte des données primaires et le mode de transmission des informations fournies sont aussi identifiés pour chaque manufacturier contacté.

Comme le profil environnemental des systèmes étudiés doit être le plus représentatif possible des ampoules utilisées au Québec, il était initialement proposé de ne considérer que les données se rapportant aux modèles les plus vendus des trois manufacturiers dominants le marché québécois des fluocompactes (Sylvania, Philips, Globe). Les principaux manufacturiers sur le marché québécois des incandescentes ne sont effectivement pas connus, mais le produit des divers manufacturiers est supposé être relativement le même en ce qui a trait à ce type d'ampoules.

Or, étant donné un nombre relativement important de données manquantes (non fournies par les manufacturiers) ou potentiellement incertaines (étant donné la variabilité des données fournies par les divers manufacturiers), l'ensemble des données collectées a été considéré dans la modélisation.

Des **hypothèses** ont par ailleurs été établies quant à la consommation d'énergie pour la production des ampoules, aux modes de gestion des déchets d'emballage et des ampoules en fin de vie et aux distances et modes de certains transports impliqués durant le cycle de vie des ampoules. Ces hypothèses sont précisées à la section suivante (4.2).

Enfin, tous les processus de production des ressources consommées et de gestion des déchets générés, ainsi que tous les transports impliqués aux diverses étapes du cycle de vie des ampoules ont été modélisés sur la base de **données secondaires** disponibles. Un tableau récapitulatif des données secondaires utilisées est aussi présenté à l'Annexe C de ce rapport.

Puisque la plupart des processus élémentaires figurant dans les systèmes à l'étude se retrouvaient dans la banque de données ICV *ecoinvent*, et afin de maximiser l'uniformité et la cohérence des données utilisées pour les modéliser, cette banque a été privilégiée

et adaptée lorsque possible (plus particulièrement en ce qui a trait au contexte énergétique nord américain, tel que discuté au paragraphe 3.2.5.2). Il est aussi à noter que plusieurs processus sans équivalent dans la base de données *ecoinvent* ont dû être modélisés à partir de données substitutives (*proxy*). Cette façon de combler les données manquantes diminue toutefois la représentativité technologique des résultats.

4.2 Description des systèmes de produits et des hypothèses du modèle ACV

Les systèmes, c'est à dire la liste des processus élémentaires inclus, ont été établis sur la base des informations fournies par les manufacturiers, de diverses hypothèses et des données génériques disponibles.

Les paragraphes qui suivent décrivent les processus élémentaires inclus et exclus des systèmes et les hypothèses associées au calcul de l'inventaire. La liste de ces processus est présentée en détail à l'Annexe C.

4.2.1 Étape de production

Peu d'information a été obtenu des manufacturiers concernant les diverses étapes de production des ampoules. Celles-ci consistent essentiellement à produire le tube/globe de verre, le culot, les électrodes/filament, puis à assembler les diverses composantes et à emballer le produit fini.

Plus spécifiquement, dans le cas de l'ampoule incandescente :

- La production du globe comprend différentes étapes de coupage, de chauffage, de soufflage et de refroidissement du verre. L'intérieur du globe ainsi produit est ensuite enduit d'une couche de silice. Certaines caractéristiques techniques peuvent également être estampées sur sa paroi extérieure.
- La production du culot comprend quant à elle des étapes de moulage de la gaine métallique (fer-blanc) et de soudure (brasure avec ou sans plomb) avec un contact électrique (cuivre). Le culot comprend aussi un isolant (verre noir).
- L'assemblage consiste ensuite à :
 - Introduire, à l'intérieur du globe, un filament de tungstène préalablement raccordé aux fils conducteurs de l'ampoule (cuivre), eux-mêmes raccordés à une tige de verre.
 - Aspirer l'air contenu dans le globe et le remplir d'un mélange d'argon et d'azote.
 - Sceller le globe et le culot, après avoir connecté le filage interne du globe aux branches de connexion du culot (cuivre).
- Enfin, l'emballage de l'ampoule est normalement constitué d'une boîte de carton (emballage primaire contenant une ou plusieurs ampoules). Aucune précision n'a été obtenue concernant l'emballage secondaire et tertiaire du produit.

Les étapes de production de l'ampoule fluocompacte sont similaires. Plus particulièrement :

- Le revêtement de la paroi interne du tube est plutôt constitué de phosphore.
- Le culot comprend aussi une base de plastique (PVC ou PBT) et un ballast électronique, ce qui explique que la masse de l'ampoule fluocompacte représente entre deux et trois fois celle de l'incandescence (en moyenne, selon les données collectées).
- Les gaz de remplissage sont l'argon et le mercure.

Ces diverses étapes n'étant pas connues de manière précise, et comme aucune donnée générique de qualité suffisante n'a pu être obtenue concernant la fabrication d'ampoules, cette étape du cycle de vie tient essentiellement compte de la production des principaux matériaux contenus dans les produits finis. Ces matériaux sont résumés au Tableau 4-1, le détail des données obtenues des divers manufacturiers étant présenté à l'Annexe C.

Tableau 4-1 : Principaux matériaux contenus dans une ampoule

Composante	Matériau ^a	Masse ^b (g)	
		A-Fluocompacte	B-Incandescence
Tube/Globe	Paroi : verre	25,15	22,75
	Revêtement : phosphore (A) ou silice (B)	0,95	0,81
Culot	Gaine métallique : fer blanc	2,35	1,71
	Branches de connexion : cuivre	1,00	0,10
	Contact électrique : cuivre	5,67	0,90
	Soudure : brasure avec ou sans plomb	0,66	0,63
	Plomb (soudure)	0,36	0,43
	Isolant : verre noir	4,97	3,33
	Base : PVC ou PBT	12,83	na
Ballast ^c	Ballast électronique	16,90	na
Électrodes/Tige	Tige : verre	1,20	3,30
	Filament : tungstène	4,36	0,11
	Filage interne: cuivre	nd	0,17
Scellant	Colle : non précisée	2,73	1,59
Gaz de remplissage	Argon	0,017	0,074
	Mercure	0,003	na
	Azote	na	0,004
Emballage	Carton	26,03	23,18
MASSE TOTALE		95,46	55,80
NOTES :			
^a Cette liste de matériaux est issue des données quantitatives collectées et certaines sources rapportent : 1) la présence d'autres matériaux , notamment en ce qui a trait à l'encre parfois appliqué sur la paroi externe du globe, ainsi qu'au revêtement du tube et des électrodes ; et 2) des alternatives possibles à ces matériaux , notamment en ce qui a trait aux gaz de remplissage (constitués de krypton plutôt que d'argon), à la composition du filage interne (alliage contenant aussi du fer et du nickel), et à la gaine métallique (constituée d'aluminium ou de cuivre plutôt que de fer-blanc). Aucune donnée quantitative de qualité n'a toutefois été obtenue concernant ces matériaux (supplémentaires et alternatifs).			
^b Masse moyenne, selon les données collectées (telles que présentées en Annexe C).			
^c Bien que seule la masse totale du ballast ait été fournie par les manufacturiers, les composantes électroniques ont été modélisées sur la base des masses obtenues en laboratoire, à partir du ballast d'une fluocompacte Phillips 15 W. Ces masses sont présentées à l'Annexe C.			

Ainsi, la production des quantités réelles de matériaux consommés (considérant les pertes de production) et de toutes les autres ressources associées à l'opération des équipements et infrastructures de production est négligée, à l'exception de la

consommation énergétique sur sites. Cette consommation d'énergie a été estimée à 10 % de l'énergie primaire¹ requise à la production des ressources consommées sur sites (24,172 et 0,864 MJ pour la fluocompacte et l'incandescente respectivement) et répartie également entre trois types d'énergie : électricité, gaz naturel et huile de combustion (hypothèse).

De plus, bien que des données primaires aient été obtenues relativement aux quantités de scellant contenu dans les deux types d'ampoules, aucune précision n'a été fournie concernant le type de scellant employé et son contenu. Comme aucune donnée générique se rapportant à ce type de produit n'a pu être obtenue, ce processus n'est pas considéré dans l'inventaire. Il est intéressant de noter que, selon des études rapportées par Parsons (2006), le scellant pourrait contenir du phénol-formaldéhyde.

Les diverses ressources sont supposées être transportées jusqu'aux sites de production par camion sur une distance moyenne estimée de 1 000 km.

Enfin, les rejets générés lors de la production des ampoules (pertes de matériaux et produits chimiques, émissions atmosphériques, effluents liquides) n'étant pas connus, leur transport et leur gestion (élimination ou autres) sont négligés.

4.2.2 Étape de distribution

Selon l'information reçue des manufacturiers, les deux types d'ampoules sont fabriqués en Chine (lieu de fabrication non précisé) et suivent un trajet relativement semblable. Comme présenté à l'Annexe C, les ampoules sont, de manière générale, transportées :

1. Entre le lieu de fabrication et le port d'expédition (mode et distance de transport non précisés ; transport par camion supposé sur une distance moyenne estimée de 200 km).
2. Entre le port d'expédition et le port d'arrivée (transport par bateau sur une distance moyenne de près de 10 000 km) :
 - a. Les ports d'expédition sont normalement situés sur la côte est de la Chine, les ports identifiés étant ceux de Xiamen, Guangzhou, Shanghai et Fuzhou.
 - b. Le port d'arrivée identifié par tous les manufacturiers est celui de Vancouver.
3. Du port de Vancouver jusqu'à Montréal (transport par train sur une distance moyenne de près de 5 000 km). Bien qu'un manufacturier (Globe Electric) ait mentionné que ses ampoules étaient plutôt transportées en train jusqu'à Toronto, puis acheminées par camion jusqu'à Montréal, cette exception n'est pas considérée dans le calcul de l'inventaire.
4. Entre le(s) centre(s) de distribution (réception/expédition) de Montréal et les divers détaillants québécois (transport par camion sur une distance moyenne estimée de 200 km).

Les distances ont été estimées à l'aide des calculateurs du *World Shipping Register* (pour le transport maritime), de Via Rails (pour le transport ferroviaire) et de Google

¹ Énergie consommée, incluant l'énergie nécessaire à l'extraction, au transport, au raffinage, etc.

(pour les transports par camion). Aucune donnée n'a été obtenue concernant la manutention et l'entreposage des ampoules aux centres de distribution et chez les détaillants. Ces étapes ne sont donc pas considérées. Elles impliquent essentiellement une consommation énergétique et la génération de rejets d'emballage (secondaire et tertiaire) possiblement négligeables.

4.2.3 Étape d'utilisation

Cette étape comprend un transport des ampoules entre les détaillants et les résidences des consommateurs, la génération de rejets d'emballage (primaire), de même qu'une consommation électrique pendant l'utilisation.

La distance moyenne entre les résidences et les détaillants québécois n'étant pas connue, et la fraction de ce transport qui est imputable aux ampoules étant difficile à établir (et potentiellement négligeable), ce processus n'est pas considéré dans le calcul de l'inventaire.

Encore une fois, la distance moyenne entre les résidences et les lieux d'enfouissement québécois n'est pas connue mais est estimée à 50 km (par camion). L'emballage primaire (carton) est supposé être recyclé à 33 % et enfoui à 67 % (selon Ressources naturelles et faunes Québec, 2005).

Conformément à l'unité fonctionnelle, la consommation électrique est calculée pour 10 000 heures d'utilisation pour chacun des systèmes :

- Système A : 1 ampoule * 13 W (représentatif des modèles les plus vendus au Québec) * 10 000 heures = 130 kWh ;
- Système B : 10 ampoules * 60 W * 1 000 heures = 600 kWh.

Comme mentionné (sous-section 3.1.1), le scénario de base néglige la chaleur dégagée par les ampoules, tandis que le scénario « effet croisé » considère cette chaleur émise soit comme une charge supplémentaire sur le système de climatisation, soit comme une réduction de charge pour le système de chauffage. L'impact évité d'une production équivalente de chaleur par un système de chauffage peut ainsi être crédité au cycle de vie des ampoules (bonus environnemental), tandis qu'un processus supplémentaire peut lui être ajouté pour tenir compte de la charge supplémentaire exigée à un système de climatisation. Rappelons que ce scénario « effet croisé » a été développé en sous-scénarios, de manière à représenter divers contextes québécois typiques. Les paragraphes suivants exposent la démarche et les hypothèses employées pour la modélisation de ces sous-scénarios.

4.2.3.1 Paramètres du scénario « effet croisé »

Le scénario « effet croisé » est essentiellement basé sur une estimation du nombre d'heures d'éclairage par jour selon trois « saisons » typiques au Québec :

- La saison froide, pendant laquelle les habitations sont chauffées ;
- La saison chaude, pendant laquelle certaines habitations sont climatisées ;
- La saison neutre, pendant laquelle les habitations ne sont ni chauffées ni climatisées.

Le tableau suivant présente les hypothèses employées à cet effet.

Tableau 4-2 : Nombre d'heures d'éclairage par année au Québec, selon les saisons

	Jours/an	Heures/jour	Heures/an
Saison froide: chauffage	200	6,7	1340
Saison chaude: climatisation potentielle	43	4,7	202,1
Saison neutre: sans chauffage ni climatisation	122	5,7	695,4
Total	365	--	2237,5
Source : Lee (2007a&b)			

Le nombre d'heures d'éclairage considéré dans l'étude étant de 10 000 heures pour chacun des deux types d'ampoules (conformément à l'unité fonctionnelle), le scénario « effet croisé » tient compte de 4,47 années d'utilisation.

La consommation énergétique des deux types d'ampoules selon les saisons est quant à elle calculée à partir de l'équation 4-1, tandis que le Tableau 4-3 présente le résultat des calculs pour une année et pour les 4,47 années considérées dans l'étude.

$$Cons(kWh / an) = Cons(W) * 1kW / 1000W * Jours / an * Heures / jour \quad 4-1$$

Cons Consommation électrique de l'ampoule (kWh/an ou W)

Jours/an Nombre de jours par année (en saison froide, chaude ou neutre)

Heures/jour Nombre d'heures d'éclairage par jour (en saison froide, chaude ou neutre)

Tableau 4-3 : Consommation énergétique (kWh) des ampoules selon les saisons

	A-Fluocompacte		B-Incandescente	
	1 an	4,47 ans	1 an	4,47 ans
Saison froide: chauffage <i>évitée</i>	17	78	80	359
Saison chaude: climatisation <i>supplémentaire</i>	3	12	12	54
Saison neutre: sans chauffage ni climatisation	9	40	42	186
Total	29	130	134	600

Pendant les 10 000 heures (ou 4,47 années) d'utilisation considérées, il est supposé que 90 % de l'énergie consommée par l'ampoule est ultimement dissipée en chaleur transmise à l'air ambiant (voir la sous-section 3.2.4). Encore une fois, cette chaleur émise permet d'éviter un apport équivalent par un système de chauffage en saison froide et entraîne une climatisation supplémentaire en saison chaude.

Les quantités d'énergie (sous forme de chaleur) transmises à l'air ambiant par les deux types d'ampoules (et affectant les systèmes de chauffage et de climatisation) sont calculées à partir de l'équation 4-2, tandis que le Tableau 4-4 présente les divers systèmes de chauffage et de climatisation et leur taux d'utilisation au Québec. Il est à noter que le chauffage au bois n'est pas considéré bien qu'il représente 9,1 % du chauffage au Québec. Ceci s'explique par le fait que la chaleur dégagée par l'ampoule n'a pas d'impact sur ce type de chauffage puisqu'il n'est pas contrôlé par un thermostat. Il n'y a donc pas d'effet croisé possible.

$$C(kWh) = Cons(kWh/an) * 4,47an * Chaleur / COP \quad \mathbf{4-2}$$

<i>C</i>	Crédit pour l'énergie évitée au système de chauffage <u>ou</u> charge supplémentaire sur le système de climatisation.
<i>Cons</i>	Consommation électrique de l'ampoule (en saison chaude <u>ou</u> froide).
<i>Chaleur</i>	% de l'énergie consommée transmise à l'air ambiant sous forme de chaleur (affectant les systèmes de chauffage et de climatisation).
<i>COP</i>	Coefficient de performance du système de chauffage <u>ou</u> de climatisation (le COP traduit le rapport entre la quantité de chaleur produite et l'énergie consommée).

Tableau 4-4 : Répartition des types de chauffage/climatisation au Québec

Type de chauffage/climatisation	% de maison chauffée/climatisée ^c	Coefficient de performance (COP) ^{b, c}
Chaudière au mazout	17,2	0,65
Chaudière au gaz naturel	5,8	0,70
Chauffage électrique	67,9	1,00
Chauffage au bois	9,1	0,40
Thermopompe - refroidissement	7,0	3,1
Climatiseur ^a	30,5	2,9
Sans climatisation	62,8	na
NOTES :		
^a Le terme « Climatiseur » regroupe le climatiseur central, le climatiseur sur fenêtre et le climatiseur mobile. Un COP moyen a été établi à partir des COP de ces types d'appareil.		
^b Coefficient de performance (COP) moyen.		
^c Informations fournies par Lee (2007b).		

4.2.3.2 Modélisation des sous-scénarios « effet croisé »

Comme mentionné, le scénario « effet croisé » a été développé en sous-scénarios, de manière à modéliser, pour chaque type d'ampoule, divers contextes d'utilisation. Les cas étudiés couvrent, d'une part, les habitations :

- Entièrement chauffées à l'électricité, au gaz naturel et au mazout (en saison froide) ;
- Climatisées et non climatisées (en saison chaude).

D'autre part, l'ensemble des types de chauffage et de climatisation selon la répartition du Tableau 4-4 a été modélisé afin de représenter la situation québécoise moyenne. Le Tableau 4-5 résume les divers sous-scénarios étudiés.

**Tableau 4-5 : Habitations québécoises typiques modélisées
par le scénario « effet croisé »**

Sous-scénario		Éclairage	Chauffage	Climatisation
SF	01	Fluocompacte	100% électrique	Avec système de climatisation
SI		Incandescente		
SF	02	Fluocompacte	100% au gaz naturel	
SI		Incandescente		
SF	03	Fluocompacte	100% au mazout	
SI		Incandescente		
SF	04	Fluocompacte	Selon la répartition québécoise (Tableau 4-4)	
SI		Incandescente		
SF	05	Fluocompacte	100% électrique	Sans système de climatisation
SI		Incandescente		
SF	06	Fluocompacte	100% au gaz naturel	
SI		Incandescente		
SF	07	Fluocompacte	100% au mazout	
SI		Incandescente		
SF	08	Fluocompacte	Selon la répartition québécoise (Tableau 4-4)	
SI		Incandescente		

4.2.4 Étape de fin de vie

Cette étape comprend la gestion des ampoules en fin de vie, incluant leur transport entre les résidences des consommateurs et les lieux de gestion.

Aucun recyclage des ampoules n'est considéré et 100 % du mercure des fluocompactes sont supposés être émis à l'air (lors des opérations de collecte, de transport et d'enfouissement). Le recyclage des fluocompactes au Québec serait en effet minimal voir inexistant à ce jour (RECYC-QUÉBEC, 2007). De la même manière, le taux de recyclage se situerait autour de 0,2 % dans le reste du Canada (Pollution Probe, 2005).

Comme mentionné, la distance moyenne entre les résidences et les lieux d'enfouissement québécois n'est pas connue mais est estimée à 50 km (par camion).

Mentionnons également que la donnée générique employée pour modéliser l'enfouissement des ampoules sous-estime, bien que probablement pas de manière significative, le dommage associé à cette étape du cycle de vie (en ce qui a trait, notamment, à la lixiviation potentiel des métaux lourds contenus dans les composantes électroniques de la fluocompacte).

4.3 Sommaire des sources de données utilisées

Le Tableau 4-6 résume les données requises à l'ICV des ampoules, de même que les diverses sources de données utilisées (pour le scénario de base). Il fournit également un aperçu des données demeurées manquantes (non comblées par des hypothèses ou données secondaires).

Tableau 4-6 : Sommaire des données requises et des sources de données utilisées pour le scénario de base

Données requises		Sources de données par étape du cycle de vie des ampoules			
		Production	Distribution	Utilisation	Fin de vie
Ressources consommées à chaque étape du cycle de vie					
Électricité	o Quantités (kWh)	o Hypothèse : 1/3*10 % de l'énergie primaire requise à la pré-production	o Données manquantes	o Manufacturiers (spécifications techniques des produits)	o Données ICV génériques européennes adaptées au contexte énergétique : 1) québécois (pour les processus d'avant-plan) ; et 2) nord-américain (pour les processus d'arrière-plan)
	o Technologies de production	o Mélange énergétique chinois modélisé à partir de données ICV génériques européennes	o Mélange énergétique québécois modélisé à partir de données ICV génériques européennes (adaptées au contexte énergétique Nord-américain)		
Combustibles	o Quantités (kg, m3,...)	o Hypothèse : 2/3*10 % de l'énergie primaire requise à la pré-production	o Données manquantes	o Non applicable	
	o Types de combustibles	o 1/3 gaz naturel; 1/3 huile à combustion			
	o Technologies de production	o Données manquantes			
	o Transport (distances, modes)	o Données manquantes			
Matières (matériaux, produits chimiques, emballages)	o Quantités (kg, m3,...)	o Manufacturiers (données incomplètes)	o Non applicable	o Non applicable	
	o Types de matière, composition des matériaux	o Données manquantes			
	o Technologies de production	o Données manquantes			
	o Transport (distances, modes)	o Données manquantes			
Eau	o Quantités (m3)	o Données manquantes	o Non applicable	o Non applicable	
	o Technologies de production				
Rejets générés à chaque étape du cycle de vie					
Émissions atmosphériques	o Quantités (kg, m3,...)	o Données manquantes	o Non applicable	o Non applicable	o Données ICV génériques européennes adaptées au contexte énergétique : 1) québécois (pour les processus d'avant-plan) ; et 2) nord-américain (pour les processus d'arrière-plan)
	o Type et composition				
Effluents liquides	o Quantités (kg, m3,...)	o Données manquantes	o Non applicable	o Non applicable	
	o Type et composition				
	o Modes de gestion				
	o Transport (distances, modes)				
Déchets solides	o Quantités (kg, m3,...)	o Données manquantes	o Emballage secondaire et tertiaire (données manquantes)	o Manufacturiers (emballage primaire)	
	o Type et composition			o Hypothèse : 50 % enfouis ; 50 % recyclé	
	o Modes de gestion			o Hypothèse : 50 km par camion	
	o Transport (distances, modes)				
Transport du produit d'une étape du cycle de vie à l'autre					
Transports	o Distance	o Non applicable	o Manufacturiers (données incomplètes)	o Données manquantes	o Hypothèse : 50 km par camion
	o Modes de transport				

4.4 Résultats du calcul de l'inventaire

Cette section présente les flux intermédiaires et élémentaires associés au cycle de vie des deux types d'ampoules.

4.4.1 Quantification des flux intermédiaires primaires

4.4.1.1 Scénario de base

Pour chacun des deux types d'ampoules, les besoins en matériaux et en énergie (en termes de transports ou d'équipements) correspondants aux flux de référence ont été déterminés. Ces flux intermédiaires, directement impliqués à chacune des étapes du cycle de vie, sont présentées au Tableau 4-7.

Selon ces flux, la masse d'une ampoule fluocompacte représente entre deux et trois fois celle d'une incandescente (en moyenne, selon les données collectées). De manière à remplir l'unité fonctionnelle, toutefois, l'utilisation d'une ampoule fluocompacte, plutôt que de dix ampoules incandescentes, entraîne une diminution de 485 % de la masse totale de matériaux consommés.

La production d'une ampoule fluocompacte impliquerait toutefois une consommation d'énergie de 64 % supérieure à celle de la production de dix ampoules incandescentes (en supposant que l'énergie requise à la production des ampoules est équivalente à 10 % de l'énergie primaire requise à la production des matières premières ; tel que présenté la sous-section 4.2.1),

Les quantités de déchets générées aux étapes d'utilisation et de fin de vie (carton d'emballage et ampoules en fin de vie) étant directement liées aux masses de matériaux consommés à l'étape de production, ces flux intermédiaires diminuent également avec l'utilisation d'une ampoule fluocompacte.

De la même manière, les distances de transports (matières premières, produits finis et déchets) étant supposées les mêmes pour les deux types d'ampoules, les flux correspondants (en tkm) observent des diminutions variant entre 370 et 791 % avec l'utilisation d'ampoules fluocompactes plutôt qu'incandescentes.

Tableau 4-7 : Flux intermédiaires primaires du scénario de base

Flux intermédiaire		A (Fluocompacte)	B (Incandescente)	Variation (A vs B)
1- Production				
<i>Matériaux</i>				
Paroi : verre	g	25,15	227,5	-805%
Revêtement : phosphore	g	0,95	0	na
Revêtement : silice	g	0	8,1	na
Gaine métallique : fer blanc	g	2,35	17,1	-628%
Branches de connexion : cuivre	g	1	1	na
Contact électrique : cuivre	g	5,67	9	-59%
Soudure (avec ou sans plomb)	g	0,66	6,3	-855%
Plomb (soudure)	g	0,36	4,3	-1094%
Isolant : verre noir	g	4,97	33,3	-570%
Base : PVC ou PBT	g	12,83	0	na
Ballast électronique	g	16,9	0	na
Tige : verre	g	1,2	33	-2650%
Filament : tungstène	g	4,36	1,1	+75%
Filage interne: cuivre	g	nd	1,7	nd
Colle : non précisée	g	2,73	15,9	-482%
Argon	g	0,017	0,74	-4253%
Mercure	g	0,003	0	na
Azote	g	0	0,04	na
Carton	g	26,03	231,8	-791%
Total - ampoule	g	95,46	558	-485%
<i>Énergie</i>				
Transport – matières premières	tkm	0,0955	0,558	-485%
Chaleur – Huile & Gaz	MJ	1,612	0,576	+64%
Électricité	kWh	0,224	0,080	+64%
2- Distribution				
<i>Énergie</i>				
Transport par camion	tkm	0,0191	0,112	-485%
Transport transocéanique	tkm	0,955	5,58	-485%
Transport par train	tkm	0,477	2,79	-485%
Transport par camion	tkm	0,0191	0,112	-485%
3- Utilisation				
<i>Énergie</i>				
Électricité	kWh	130	600	-362%
Transport – Déchets	tkm	0,001	0,012	-791%
<i>Déchets (emballage)</i>				
Carton (67% enfoui; 33% recyclé)	g	26,03	231,8	-791%
4- Fin de vie				
<i>Énergie</i>				
Transport – Déchets	tkm	0,003	0,016	-370%
<i>Déchets (ampoules)</i>				
Base de plastique (enfouie)	g	12,83	0	na
Autres composantes (enfouies)	g	56,27	321,9	-472%
<i>Émissions</i>				
Mercure (air)	g	0,003	0	na
Plomb (eau)	g	0,36	4,3	-1094%

4.4.1.2 Scénario « effet croisé »

Les quantités d'énergie (sous forme de chaleur) transmises à l'air ambiant par les deux types d'ampoules sont calculées à partir de l'équation 4-2 (voir le paragraphe 4.2.3.1), tandis que le Tableau 4-8 présente le résultat des calculs pour 10 000 heures (4,47 années) d'éclairage.

L'énergie consommée par l'ampoule incandescente étant supérieure à celle consommée par la fluocompacte (+362 %), son utilisation entraîne évidemment une plus grande charge sur les systèmes de climatisation en saison chaude, mais également un plus grand crédit (ou bonus environnemental) pour l'énergie évitée aux systèmes de chauffage en saison froide.

Il est aussi possible de constater que le crédit pour l'énergie évitée aux systèmes de chauffage est environ de 20 à 30 fois supérieur à la charge supplémentaire sur les systèmes de climatisation. Ceci s'explique par :

- Le nombre d'heures d'éclairage, qui est supérieur en saison froide (1 340 heures/an, comparativement à 202 heures/an en saison chaude).
- Les coefficients de performance des systèmes (inférieurs à 1 dans le cas des systèmes de chauffage, supérieurs à 1 dans le cas des systèmes de climatisation).

Tableau 4-8 : Énergie évitée aux systèmes de chauffage et charge supplémentaire sur les systèmes de climatisation pour 10 000 heures (4,47 années) d'éclairage

	A (Fluocompacte)	B (Incandescente)	Variation (A vs B)
Saison froide : chauffage évité	kWh	kWh	%
Chauffage électrique	70,3	324	-362
Chauffage au gaz naturel	100	463	-362
Chauffage au mazout	108	499	-362
Saison chaude : climatisation supplémentaire	kWh	kWh	%
Climatiseurs	3,42	15,8	-362
Thermopompe	3,65	16,9	-362

4.4.2 Quantification des flux élémentaires

Les flux intermédiaires (primaires) ont ensuite été convertis en flux élémentaires au moyen des données secondaires collectées. Ces flux élémentaires représentent les flux échangés avec l'environnement, soit les flux entrants (ressources naturelles) et les flux sortants (émissions dans l'air, l'eau et le sol) des systèmes de produits.

Le détail des résultats d'inventaire est présenté à l'Annexe C. Celle-ci présente les principaux flux élémentaires massiques rapportés à l'unité fonctionnelle, c.-à-d. associés au cycle de vie des ampoules nécessaires pour fournir 10 000 heures d'éclairage.

À la lumière de ces résultats, l'utilisation d'une ampoule fluocompacte, relativement à dix ampoules incandescentes (nécessaires pour fournir le même service qu'une fluocompacte), implique une importante diminution de pratiquement tous les flux élémentaires. Contrairement aux résultats obtenus par Parsons (2006), toutefois, le mercure total émis à l'air (c.-à-d. sur l'ensemble du cycle de vie des deux types

d'ampoules) observe une augmentation de 80 % avec l'utilisation de fluocompactes plutôt que d'incandescentes. Rappelons que ces résultats considèrent néanmoins que les fluocompactes ne sont pas récupérées en fin de vie et que le mercure qu'elles contiennent est entièrement émis à l'air.

Plus particulièrement, la consommation de ressources et les émissions à l'air associées au cycle de vie d'une fluocompacte représentent plus ou moins le cinquième (20 %, sur une base massique) de celles associées au cycle de vie de dix incandescentes. De plus, les émissions à l'eau et au sol d'une fluocompacte sont pratiquement négligeables relativement à celles d'une incandescente (moins de 3 % massique).

Rappelons tout de même que ces résultats ne tiennent pas compte de la production du ballast, laquelle est tout de même intégrée au profil environnemental caractérisé et agrégé au sein de catégories d'impacts (tel que présenté au chapitre suivant). En effet, comme discuté à la sous-section 3.2.6, même si les flux entrants et sortants associés à cette production ne sont pas connus et donc, ne sont pas considérés dans l'inventaire du cycle de vie, l'impact associé est pleinement pris en compte dans l'évaluation.

La caractérisation et l'agrégation de ces flux au sein de catégories d'impact et de dommage facilite par ailleurs l'interprétation des résultats. Il est en effet possible de constater, au tableau de l'Annexe C, que les principaux flux élémentaires ne sont pas toujours les mêmes pour les deux systèmes, ni leur ordre en termes d'importance massique ou de pertinence environnementale.

5. ÉVALUATION DES IMPACTS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les données d'inventaire et les impacts environnementaux associés au cycle de vie des deux types d'ampoules ont finalement été évalués et interprétés conformément au cadre méthodologique présenté à la sous-section 3.2.6.

5.1 Évaluation du scénario de base

5.1.1 Résultats d'indicateur de dommage/d'impact

Les résultats d'indicateur de dommage sont présentés à l'Annexe C pour chaque étape du cycle de vie des deux types d'ampoules. La Figure 5-1 présente ces résultats. Pour chaque catégorie de dommage, deux barres sont indiquées, la première représentant l'ampoule fluocompacte (système A) et la deuxième l'ampoule incandescente (système B). Il est important de noter que :

- Toutes les contributions sont exprimées en termes relatifs puisqu'elles sont rapportées au total obtenu pour l'incandescente, qui correspond ainsi à la valeur de 100 % (ceci est dû au fait que les indicateurs de dommage n'ont pas la même unité et que leurs résultats diffèrent de plusieurs ordres de grandeur en valeur absolue).
- Le graphique présente des intervalles d'incertitudes ; ceux-ci sont discutés à la section 5.3.

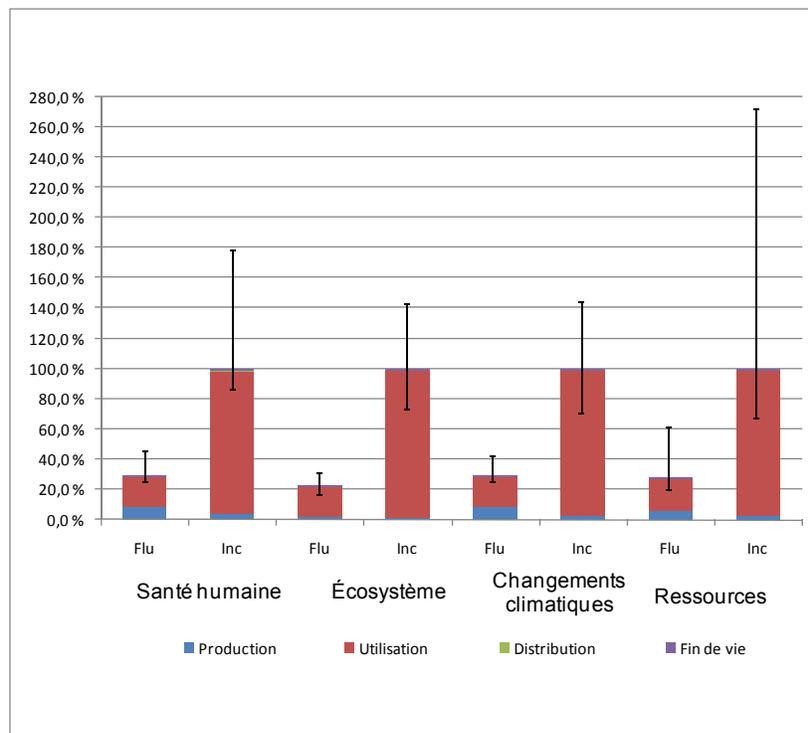


Figure 5-1 : Dommages associés au scénario de base pour les deux types d'ampoules.

Un premier constat est l'importante contribution, à chaque catégorie de dommage, de l'étape d'**utilisation** des deux types d'ampoules. Celle-ci représente entre 69 et 93 % des potentiels de dommages dans le cas de la fluocompacte et entre 93 et 99 % dans le cas de l'incandescente. La **production** des ampoules serait quant à elle responsable de 6 à 30 % et de 1 à 5 % des dommages de la fluocompacte et de l'incandescente respectivement, alors que la distribution et la fin de vie semblent plutôt négligeables dans les deux cas.

Ces conclusions sont similaires pour la plupart des catégories d'impact, incluant l'acidification et l'eutrophisation aquatique. L'analyse des résultats d'indicateur d'impact (non présentés dans le tableau) montre toutefois que l'écart entre l'utilisation et la production des ampoules diffère pour certaines catégories (relativement à l'écart observé sur les résultats d'indicateur de dommage). Le Tableau 5-1 présente les catégories d'impact dont l'écart entre l'utilisation et la production est significativement différent de celui observé pour le dommage.

Tableau 5-1 : Écart des résultats d'indicateur (dommage et impact) entre les étapes d'utilisation et de production des ampoules

Dommage		Impact (dont l'écart est différent de celui observé pour le dommage)	
Catégorie	Écart (%) (utilisation vs production)	Catégorie	Écart (%) (utilisation vs production)
A-Fluocompacte			
Santé humaine	39	Radiations ionisantes	84 (écart supérieur)
Qualité des écosystèmes	87	Acidif./eutroph. terrestre	36 (écart inférieur)
		Occupation des terres	15 (écart inférieur)
Changement climatique	41	Aucune	na
Ressources	53	Extraction minière	-55 (écart inversé)
B-Incandescente			
Santé humaine	88	Aucune	na
Qualité des écosystèmes	98	Occupation des terres	63 (écart inférieur)
Changement climatique	93	Aucune	na
Ressources	93	Extraction minière	-44 (écart inversé)
NOTE : Un écart supérieur indique que les résultats d'indicateur d'impact des étapes d'utilisation et de production sont plus éloignés l'un de l'autre (comparativement aux résultats d'indicateurs de dommage), tandis qu'un écart inférieur signifie qu'ils sont plus rapprochés. Enfin, un écart négatif (inversé) signifie que l'étape de production contribue davantage que l'utilisation à l'indicateur d'impact. L'inversion observée pour l'extraction minière contribue cependant peu au dommage sur les ressources.			

Le deuxième constat est similaire à celui de l'analyse de l'inventaire, c.-à-d. une diminution, avec l'utilisation d'ampoules fluocompactes, de tous les résultats d'indicateur de dommage, sauf pour :

- L'étape de production (augmentation de tous les indicateurs) ;
- La qualité des écosystèmes en fin de vie.

La production d'une ampoule fluocompacte serait en effet plus dommageable d'environ 25 à 75 % que celle de 10 ampoules incandescentes (nécessaires pour fournir le même service qu'une fluocompacte), essentiellement dû à la production des composantes électroniques (ballast). En ne considérant pas ces composantes, le dommage associé à la production de la fluocompacte ne représente que 40 à 60 % environ de celui associé à la production de 10 incandescentes (sauf pour la catégorie « changement climatique » où le dommage associé aux deux types d'ampoules est quasi équivalent).

Les augmentations d'indicateurs de dommage observées aux étapes de production et de fin de vie sont toutefois inférieures aux diminutions observées pour les autres étapes du cycle de vie. Une diminution nette est également observée pour tous les résultats d'indicateur d'impact.

Le dommage associé au cycle de vie complet des fluocompactes représente ainsi, selon les catégories, entre 20 et 30 % de celui associé au cycle de vie des incandescentes (28 % en moyenne). De la même manière, l'impact associé aux fluocompactes représente entre 20 et 50 % de celui associé aux ampoules incandescentes (30 % en moyenne).

5.1.2 Analyse de contribution

L'analyse des résultats de l'étape d'utilisation montre que la production et la transmission d'électricité est l'unique contributeur à pratiquement 100 % des dommages potentiels. Cette conclusion n'est pas surprenante puisque cette étape n'implique, outre la consommation d'électricité, que le transport et la gestion (élimination/recyclage) du carton d'emballage.

Plus particulièrement, la production d'électricité est le principal contributeur pour les catégories « changement climatique » et « ressources ». En ce qui concerne la santé humaine, la production d'électricité partage toutefois la contribution de manière quasi équivalente avec sa transmission, tandis que ce dernier processus domine la contribution au dommage sur la qualité des écosystèmes. Le tableau suivant précise les paramètres environnementaux clés de l'étape d'utilisation.

Tableau 5-2 : Paramètres environnementaux clés liés à la consommation d'électricité (bas voltage) selon le mélange d'approvisionnement en énergie du réseau d'Hydro-Québec

Catégorie de dommage/impact	Processus	Contribution approx.	Paramètres clés
Santé humaine (HH)	Production	< 55 %	Production au charbon , hydraulique (réservoirs et fil de l'eau) et au gaz industriel
	Transmission	> 45 %	Production de cuivre
Qualité des écosystèmes (EQ)	Production	> 15 %	Production au charbon et hydraulique (réservoirs) et, dans une moindre mesure, production nucléaire
	Transmission	< 85 %	Émissions au sol de cuivre et de chrome VI
Changements climatiques (CC)	Production	< 90 %	Production au charbon et au gaz industriel et, dans une moindre mesure, production hydraulique (réservoirs) et au mazout
	Transmission	> 10 %	Production de cuivre et d'acier, production et élimination de PVC
Ressources (R)	Production	< 95 %	Production nucléaire et, dans une moindre mesure, production au charbon et au mazout
	Transmission	> 5 %	Production de cuivre, d'acier et de PVC
Acidification aquatique (AA)	Production	< 55 %	Production au charbon et, dans une moindre mesure, production hydraulique (réservoirs) et au mazout
	Transmission	> 45 %	Production de cuivre
Eutrophisation aquatique (EUTROA)	Production	< 65 %	Production au mazout et, dans une moindre mesure, production hydraulique (réservoirs et fil de l'eau)
	Transmission	> 35 %	Production d' acier et, dans une moindre mesure, de cuivre

5.2 Étude de scénarios

5.2.1 Scénario « effet croisé »

L'effet croisé de la chaleur dégagée par les ampoules pendant l'éclairage a été considéré pour le cas d'une habitation chauffée à l'électricité, au gaz ou au mazout, l'effet croisé de cette chaleur sur les systèmes de climatisation étant négligeable. Les dommages (et impacts) associés à la charge supplémentaire sur les systèmes de climatisation en saison chaude sont en effet négligeables relativement à ceux associés au crédit pour l'énergie évitée et même, à ceux associés aux scénarios de base (c.-à-d. que même sans l'attribution d'un crédit, les dommages (et impacts) de la climatisation ne sont pas significatifs relativement à ceux du reste du cycle de vie des ampoules). Ainsi, afin d'alléger la présentation, seul l'effet du chauffage évité est présenté aux paragraphes suivants.

La répartition moyenne des types de chauffage au Québec a aussi été étudiée, de manière à évaluer les avantages d'une utilisation des fluocompactes à l'échelle québécoise (par l'entremise d'une politique publique, par exemple).

Enfin, il est à noter que les résultats considèrent une utilisation annuelle de l'un ou l'autre des deux types d'ampoules, ce qui implique que le crédit environnemental pour le chauffage évité n'est attribué que pour une fraction (environ 60 %) des 10 000 heures d'éclairage considérées par l'unité fonctionnelle. La sensibilité des résultats à l'attribution d'un crédit pour le chauffage évité durant 10 000 heures d'utilisation (et donc, en considérant une utilisation des ampoules en saison froide uniquement) a aussi été analysée (voir paragraphe 5.4.1.4).

5.2.1.1 Habitations chauffées à l'électricité, au gaz ou au mazout

Les figures suivantes présentent les résultats d'indicateur de dommage pour les divers sous-scénarios « effet croisé ». Pour chaque catégorie, trois barres sont indiquées, la première représentant la fluocompacte (système A), la deuxième l'incandescente (système B) et la troisième la différence entre les deux types d'ampoules. Encore une fois : 1) toutes les contributions sont exprimées en termes relatifs puisqu'elles sont rapportées au total obtenu pour le scénario de base de l'incandescente, correspondant ainsi la valeur de 100 % ; et 2) les intervalles d'incertitudes sont discutés à la section 5.3.

Ainsi, pour le cas d'une habitation chauffée à l'**électricité**, il est possible de constater que l'utilisation d'ampoules fluocompactes demeure l'option qui semble la plus avantageuse pour toutes les catégories de dommage. Ce résultat n'est pas surprenant puisque :

1. Les quantités créditées (voir Tableau 4-8) sont inférieures aux quantités requises à l'éclairage (130 kWh pour la fluocompacte et 600 kWh pour l'incandescente) ; *et*
2. Le processus de consommation d'électricité créditée (pour le chauffage évité) est identique au processus de consommation d'électricité pour l'éclairage (dans le scénario de base).

Dans ce cas, le crédit accordé n'est donc pas suffisant pour compenser les dommages associés au scénario de base et l'ampoule fluocompacte demeure l'option la plus

favorable. Les indicateurs d'impact (non présentés à la Figure 5-2) sont, de la même manière, tous favorables à l'ampoule fluocompacte pour ce sous-scénario.

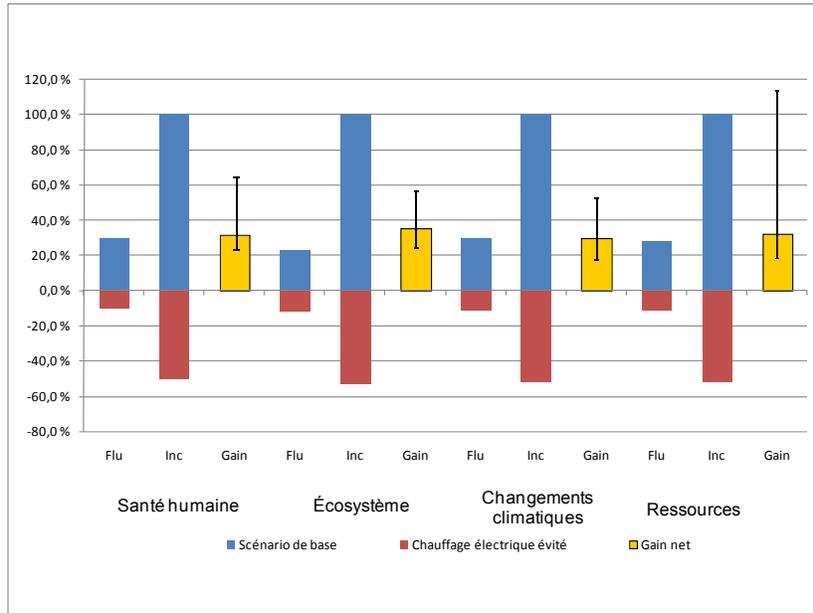


Figure 5-2 : Dommages associés au scénario « effet croisé » pour le cas d'une habitation chauffée à l'électricité.

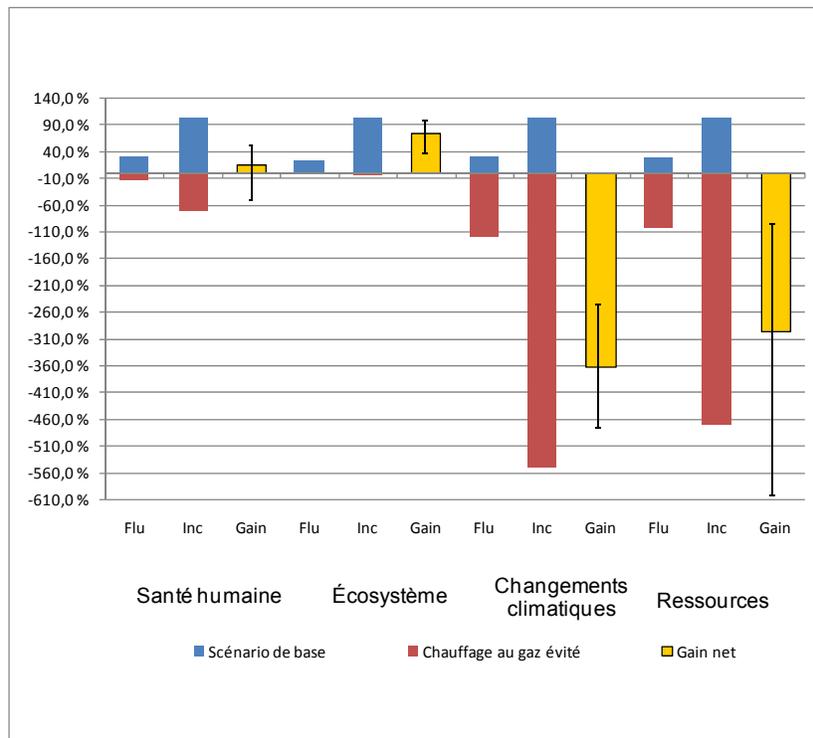


Figure 5-3 : Dommages associés au scénario « effet croisé » pour le cas d'une habitation chauffée au gaz naturel.

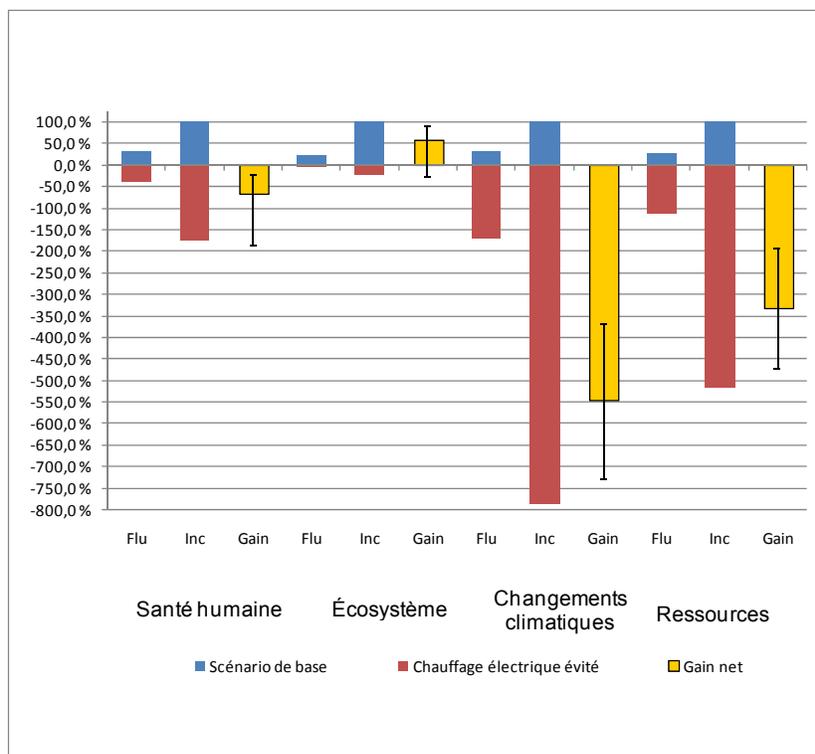


Figure 5-4 : Dommages associés au scénario « effet croisé » pour le cas d'une habitation chauffée au mazout.

En ce qui concerne les habitations chauffées au gaz ou au mazout, les quantités créditées sont, encore une fois, inférieures aux quantités requises à l'éclairage (Tableau 4-8). Toutefois, les flux élémentaires associés aux processus de chauffage (par MJ) étant plus nombreux et/ou plus importants (en termes de contribution massique et/ou de pertinence environnementale) que ceux associés au scénario de base, le crédit accordé arrive à compenser certains dommages de ce scénario de base. Plus précisément, ce crédit vient du fait qu'une quantité de chaleur autrement produite par un système au mazout ou au gaz est « évitée », en la remplaçant par de la chaleur produite à l'électricité et donc, moins dommageable (l'électricité consommée par les ampoules pour l'éclairage). Comme ce crédit est supérieur dans le cas des incandescentes, l'utilisation de ce type d'ampoule devient plus avantageuse sous certaines conditions.

Plus particulièrement, pour le cas d'une habitation chauffée au **gaz naturel**, l'utilisation d'ampoules incandescentes est l'option qui semble la plus avantageuse concernant les dommages associés aux changements climatiques et aux ressources. De plus, bien que les dommages à la santé humaine et à la qualité des écosystèmes soient, pour leur part, en faveur des fluocompactes, le gain net associé à l'utilisation de ce type d'ampoule est plus de 5 fois inférieur au gain net associé à l'utilisation d'incandescentes pour les catégories « changements climatiques » et « ressources ».

De la même manière, pour le cas d'une habitation chauffée au **mazout**, l'utilisation d'incandescentes obtient, pour 3 des 4 catégories de dommage, un gain net plus de 15 fois supérieur au gain obtenu par la fluocompactes pour le seul dommage à la qualité des écosystèmes.

Enfin, le Tableau 5-3 identifie les catégories d'impact dont les conclusions sont inversées comparativement à celles tirées des catégories de dommage. Les éléments pouvant potentiellement diminuer l'intérêt pour l'utilisation d'ampoules incandescentes dans les habitations chauffées au gaz ou au mazout sont indiqués en caractères gras dans le tableau.

Tableau 5-3 : Catégories d'impact dont le plus grand contributeur (fluocompacte vs incandescente) est différent de celui observé au dommage

Dommage		Catégories d'impact
Catégorie	Plus grand contributeur	
Gaz naturel		
Santé humaine	Incandescente	Effets cancérogènes
		Détérioration de la couche d'ozone
		Oxydation photochimique
Qualité des écosystèmes	Incandescente	Acidification/eutrophisation terrestre
Changement climatique	Fluocompacte	Aucune
Ressources	Fluocompacte	Extraction minière
Aucune	na	Acidification aquatique (en faveur de l'incandescente)
		Eutrophisation aquatique (en faveur de la fluocompacte)
Mazout		
Santé humaine	Fluocompacte	Effets non-cancérogènes
		Radiations ionisantes
Qualité des écosystèmes	Incandescente	Acidification/eutrophisation terrestre
		Occupation des terres
Changement climatique	Fluocompacte	Aucune
Ressources	Fluocompacte	Extraction minière
Aucune	na	Acidification aquatique (en faveur de l'incandescente)
		Eutrophisation aquatique (en faveur de l'incandescente)

5.2.1.2 Chauffage selon la répartition moyenne québécoise

Le scénario « effet croisé » correspondant à la répartition moyenne des types de chauffage au Québec est présenté à la Figure 5-5. Ce scénario possède un profil similaire à celui de l'habitation chauffée au gaz naturel. Pour ce scénario, l'ampoule incandescente est l'option la plus avantageuse concernant les dommages associés aux changements climatiques et aux ressources. Et, bien que les deux autres catégories de dommage soient en faveur des fluocompactes, le gain net associé est inférieur à celui associé aux ampoules incandescentes pour les catégories « changements climatiques » et « ressources ».

Enfin, les catégories d'impact identifiées pour le gaz naturel au Tableau 5-3 s'appliquent aussi à ce quatrième sous-scénario « effet croisé ».

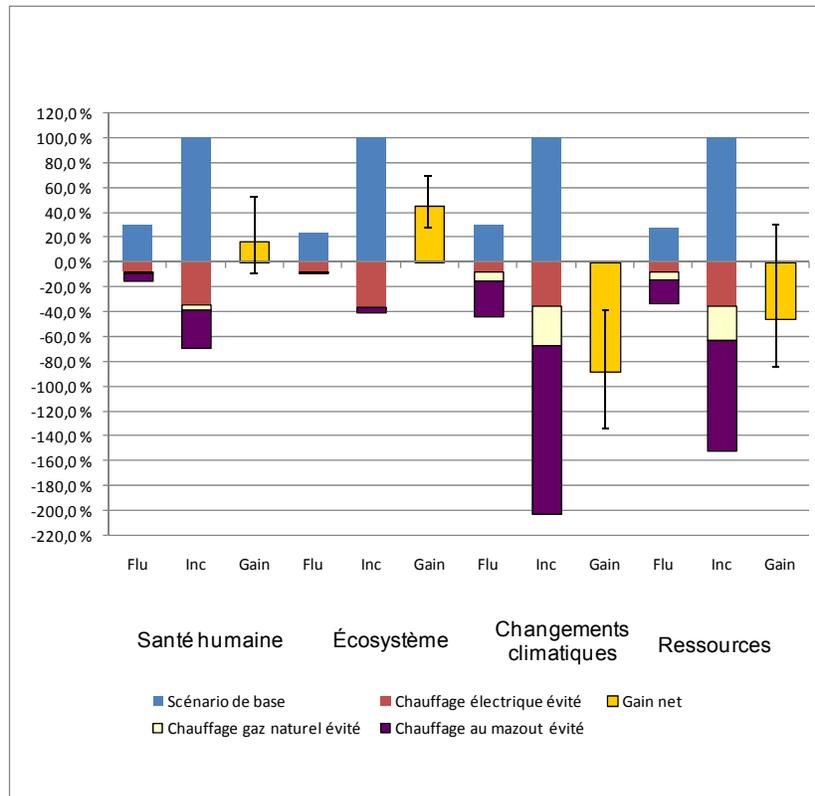


Figure 5-5 : Dommages associés au scénario « effet croisé » selon la répartition moyenne des types de chauffage au Québec.

5.2.2 Scénarios de fin de vie

Les scénarios de fin de vie initialement proposés n'ont pas été réalisés dans le cadre de ce projet. En effet :

- À la lumière des résultats obtenus pour le scénario de base, l'étape de fin de vie apparaît comme étant négligeable relativement aux étapes d'utilisation et, dans une moindre mesure, de production des ampoules.
- Comme le scénario de base ne considère aucun recyclage des ampoules et qu'il suppose l'émission à l'air de 100 % du mercure des fluocompactes, une analyse de scénarios considérant divers taux de récupération des ampoules devrait normalement diminuer davantage l'importance relative de l'étape de fin de vie. En effet :
 - Les émissions de mercure à l'air seraient alors moindres, voire nulles ;
 - L'impact total associé au recyclage des ampoules serait alors attribuable, en tout ou en partie, à d'autres systèmes de produits (utilisateurs des ampoules valorisées). Ainsi, l'impact du recyclage attribuable au cycle de vie des ampoules serait normalement moindre que celui de l'enfouissement (lequel est entièrement attribuable aux ampoules).

Rappelons toutefois que la modélisation actuelle de l'enfouissement des ampoules sous-estime, bien que probablement pas de manière significative, le dommage associé à

cette étape du cycle de vie (en ce qui a trait, notamment, à la lixiviation potentiel des métaux lourds contenus dans les composantes électroniques de la fluocompacte).

5.3 Analyses d'incertitude

Sur les milliers de flux élémentaires individuels inventoriés dans les processus élémentaires des différents scénarios étudiés, la très grande majorité provient de la banque de données *ecoinvent*. De ces flux, la majorité présente une variabilité qui prend la forme d'une distribution « lognormale » autour de la valeur centrale spécifiée (et utilisée dans les calculs « déterministes ») et caractérisée par son écart-type. Il faut par contre préciser que la variabilité introduite dans les données par les auteurs de la banque *ecoinvent* ne correspond pas à la variabilité réelle des processus (c.-à-d. déterminée statistiquement sur des mesures concrètes réalisées lors de la collecte des données) mais est estimée par l'application d'un « pedigree » décrivant la qualité d'une donnée selon son origine, son mode de collecte, sa représentativité et déterminé subjectivement par les auteurs de la banque. Il est donc essentiel de comprendre que l'objectif ici est de souligner le caractère incertain des conclusions et que la variabilité n'est rendue disponible qu'à titre indicateur, à défaut d'avoir une information de meilleure qualité.

La variabilité de la plupart des données primaires collectées a aussi été estimée. Elle est présentée au tableau suivant.

Tableau 5-4 : Hypothèses quant à l'incertitude des données primaires

Paramètre	Type de distribution supposé	Valeurs et hypothèses
Masse des matières premières (à l'exception du ballast)	Uniforme	Valeurs moyenne, minimum et maximum fournies par les manufacturiers
Distance des transports	Normale	Valeur supposée +/- 50 %
Quantité d'énergie de production	Normale	Valeur supposée +/- 5 %
Consommation des ampoules	Normale	Valeur spécifiée +/- 2 W
Nombre de jours par saison	Normale	Valeur spécifiée +/- 15 %
Nombre d'heures d'éclairage par jour, selon les saisons	Normale	Valeur spécifiée +/- 2 heures
% de l'énergie consommée par l'ampoule dissipée en chaleur	Uniforme	Valeurs moyenne (0,95), minimum (0,90) et maximum (1) supposées
% de la chaleur dissipée transmise à l'air ambiant		
COP des systèmes de chauffage et de climatisation	Aucune	Valeurs (moyennes) déterministes spécifiées

Une analyse d'incertitude due à la variabilité des données d'inventaire a donc été réalisée. Le logiciel SimaPro 7.1 a permis de réaliser une analyse de type Monte-Carlo (c.-à-d. une étude de la propagation de la variabilité des données d'inventaire lors des calculs, qui sont alors « probabilistes »), avec un nombre d'itérations fixé à 1 000. Les résultats sont présentés aux sous-sections suivantes pour le scénario de base et le scénario « effet croisé ».

5.3.1 Scénario de base

Les intervalles d'incertitude présentés à la Figure 5-1 (à la section 5.1) ne montrent aucune possibilité que les conclusions soient inversées pour le scénario de base. Ainsi, selon ces résultats, il est peu probable que l'ampoule fluocompacte soit le plus gros contributeur à l'une ou l'autre des catégories de dommage.

C'est aussi ce que confirment les résultats des calculs effectués sur la soustraction du système B (incandescente) au système A (fluocompacte). Selon ces calculs, quand l'impact calculé pour le système A est supérieur à celui calculé pour le système B, le résultat de l'itération est positif ; ce résultat est négatif si le système B montre un impact plus élevé. Il est ainsi possible de connaître la probabilité qu'un système montre un impact plus élevé que l'autre. La figure suivante illustre graphiquement le résultat de ce type d'analyse.

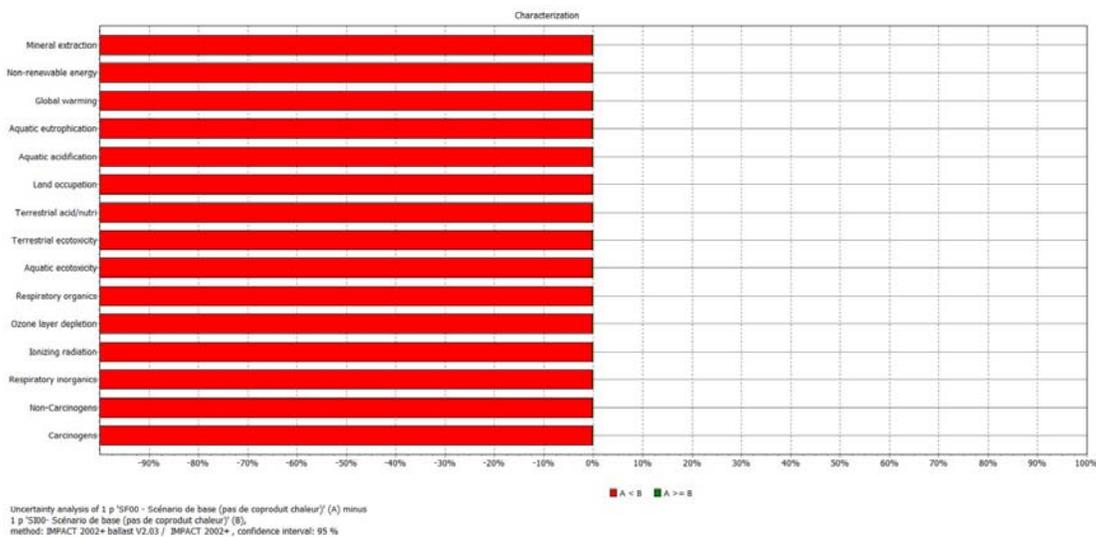


Figure 5-6 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario de base.

Pour le scénario de base, l'analyse d'incertitude permet donc de conclure que l'éclairage avec des ampoules fluocompactes plutôt qu'incandescentes est accompagné d'une diminution des dommages (incluant toutes les catégories d'impact).

5.3.2 Scénario « effet croisé »

Pour le scénario « effet croisé », les intervalles d'incertitude présentés aux figures de la section 5.2 montrent que les conclusions pourraient être inversées pour certaines catégories de dommage.

5.3.2.1 Habitations chauffées à l'électricité, au gaz ou au mazout

Tout comme pour le scénario de base, les intervalles d'incertitude présentés à la Figure 5-2 (section 5.2) ne montrent aucune possibilité que les conclusions soient inversées pour le cas d'une habitation chauffée à l'électricité. Il est donc peu probable

que l'ampoule fluocompacte soit le plus gros contributeur à l'une ou l'autre des catégories de dommage pour ce scénario.

C'est aussi ce que confirment les résultats de la simulation Monte Carlo effectuée sur la soustraction des indicateurs de dommage de chacun des systèmes (A – B). Comme présenté à la figure suivante, la simulation effectuée sur les indicateurs d'impact montre cependant une faible probabilité (inférieure à 2 %) d'occurrence du résultat $A \geq B$ pour les catégories « oxydation photochimique » et « occupation des terres ».

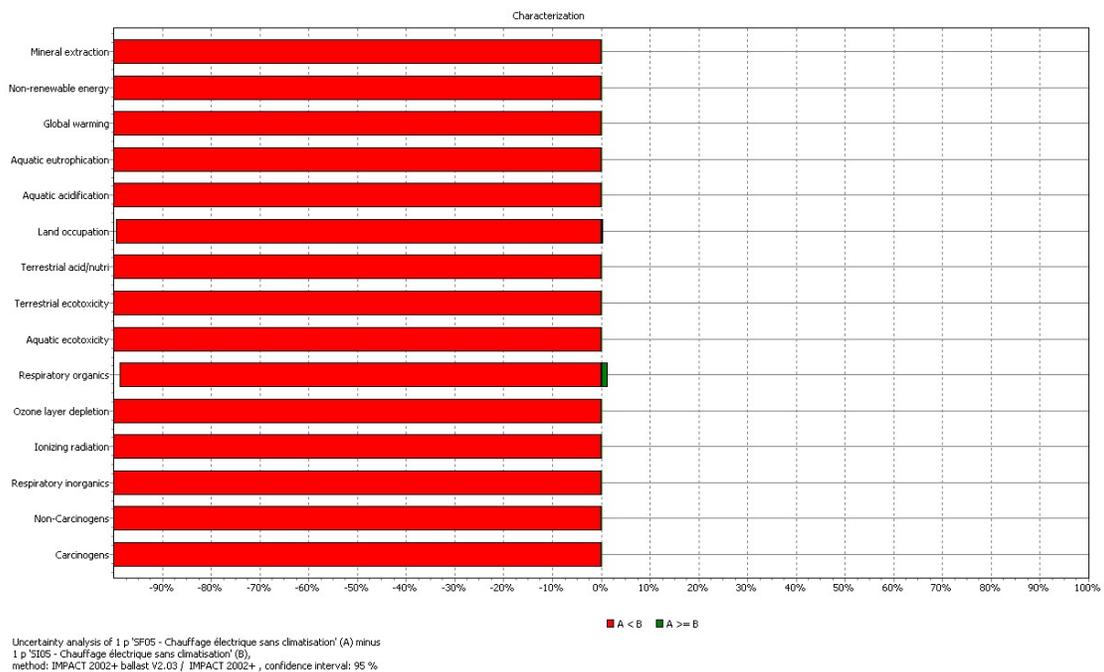


Figure 5-7 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Habitation chauffée à l'électricité.

Pour les habitations chauffées au gaz et au mazout (voir Figure 5-3 et Figure 5-4 à la section 5.2), les inversions possibles sont toutes en faveur de l'incandescence, ce qui augmente son avantage potentiel. Selon les résultats de la simulation Monte Carlo effectuée sur la soustraction des indicateurs de dommage, la probabilité d'occurrence du résultat $A \geq B$ pour les catégories initialement en faveur de l'ampoule fluocompacte est toutefois inférieure à 20 % pour les deux types de chauffage. La simulation Monte Carlo effectuée sur les indicateurs d'impact est quant à elle présentée aux figures suivantes.

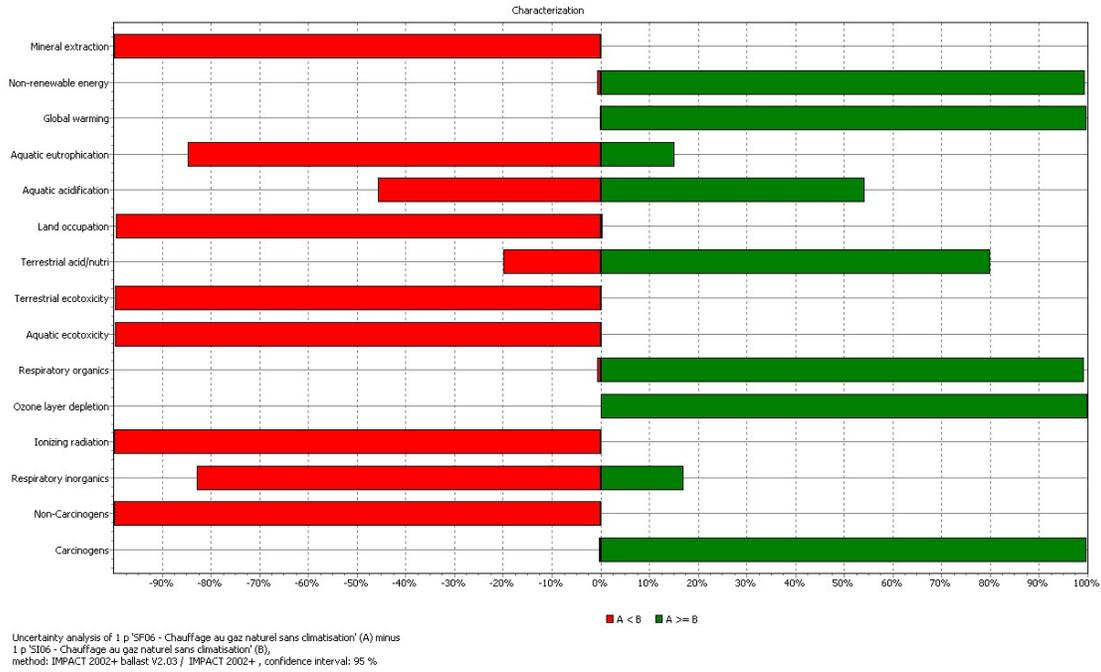


Figure 5-8 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Habitation chauffée au gaz naturel.

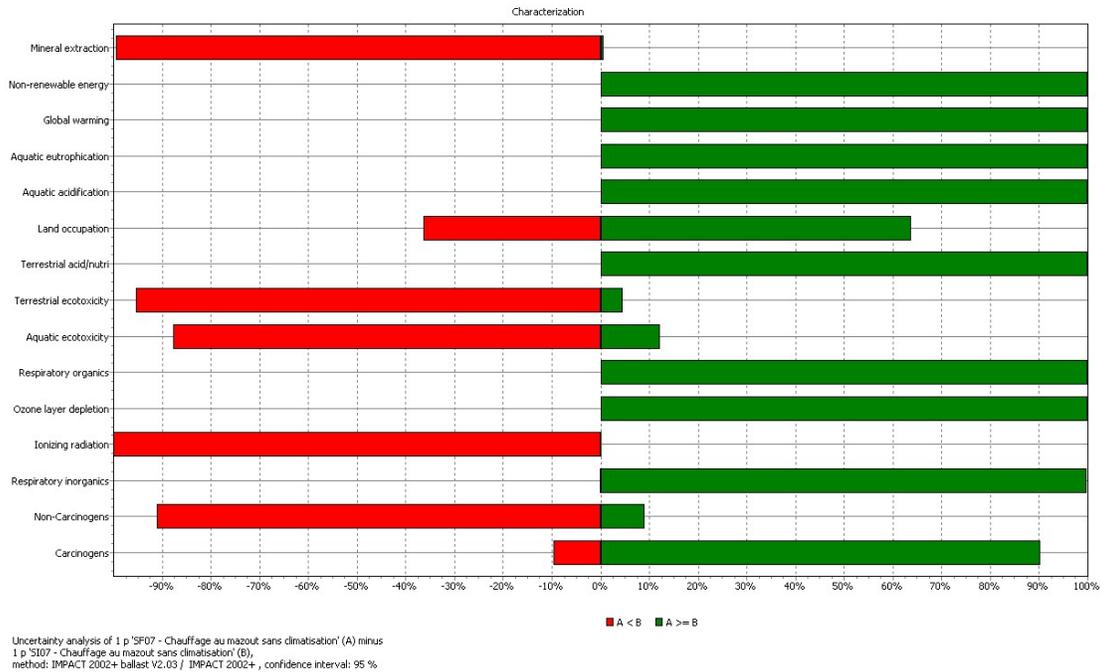


Figure 5-9 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Habitation chauffée au mazout.

5.3.2.2 Chauffage selon la répartition moyenne québécoise

En ce qui a trait au scénario représentant la répartition moyenne des types de chauffage au Québec les intervalles d'incertitudes présentés à la Figure 5-5 (section 5.2) montrent toutefois que :

- L'ampoule fluocompacte peut être l'option la plus favorable concernant tous les dommages, à l'exception des changements climatiques ;
- Le gain net associé à l'ampoule incandescente pour la catégorie « changements climatiques » peut être inférieur à celui associé à la fluocompacte pour les autres catégories de dommage.

Pour ce scénario, il est donc difficile d'identifier laquelle des deux alternatives semble préférable à l'autre. C'est aussi ce que confirment les résultats de la simulation Monte Carlo effectuée sur la soustraction des indicateurs de dommage (tels que présentés à la figure suivante).

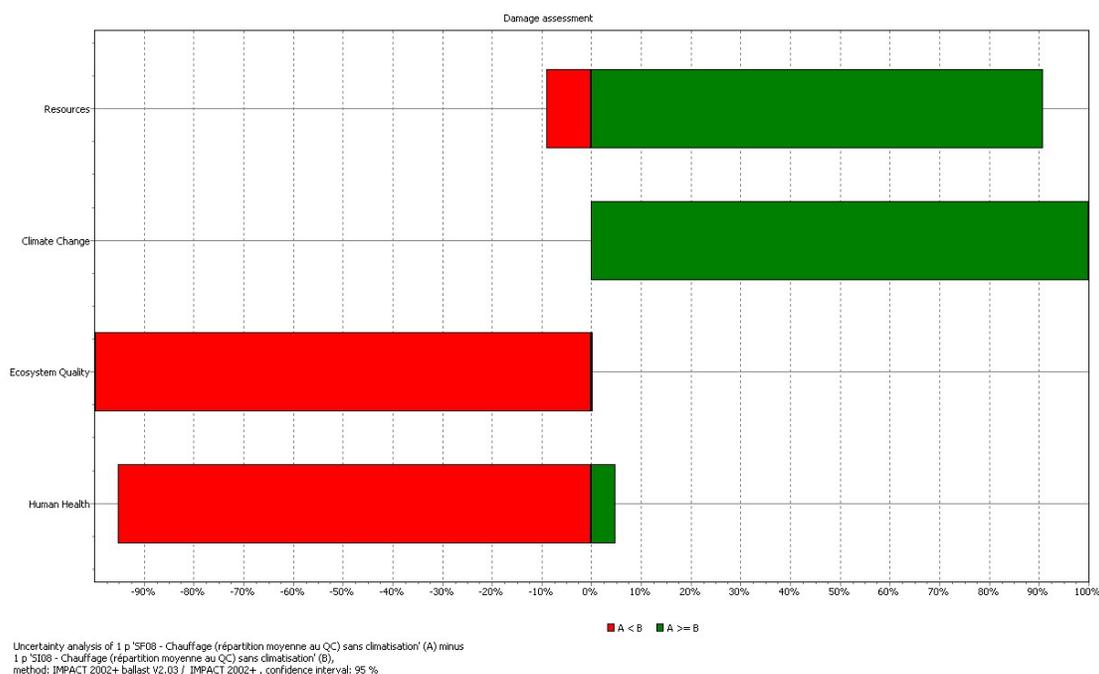


Figure 5-10 : Probabilité d'occurrence du résultat de la soustraction des systèmes (A - B) pour le scénario « effet croisé » - Chauffage selon la répartition moyenne au Québec.

5.4 Analyses de sensibilité

Comme discuté à la section précédente, plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, notamment liée au choix des hypothèses, ainsi qu'aux modules de données génériques et modèles d'évaluation des impacts (et dommages) employés. Les résultats obtenus sont liés à ces paramètres et leur incertitude est transférée aux conclusions tirées.

Afin de tester la robustesse de certains paramètres, des analyses de sensibilité ont été réalisées au cours desquelles les valeurs des paramètres incertains ont été changées pour des valeurs différentes quoique vraisemblables. L'étendue des variations que prennent alors les résultats indiquent l'importance des paramètres modifiés ainsi que la plage dans laquelle se situe fort probablement les résultats les plus valides.

5.4.1 Choix des hypothèses

Les hypothèses du scénario de base concernent essentiellement les données initialement manquantes et comblées (ou non) par des estimations, de même que la valeur de certains paramètres techniques des ampoules, en particulier leur durée de vie et la consommation des fluocompactes (influencée par leur facteur de puissance). Les hypothèses du scénario « effet croisé » concernent quant à elles :

- Les paramètres relatifs aux nombre d'heures d'éclairage selon les saisons ;
- La fraction de l'énergie consommée par les ampoules qui est ultimement transmise à l'air ambiant (et évitée à un système de chauffage) ;
- La fraction de la chaleur dissipée pouvant être créditée au cycle de vie des ampoules ; et
- La valeur des coefficients de performance (COP) des systèmes de chauffage et de climatisation (correspondant à des valeurs moyennes représentatives de ces systèmes au Québec).

Comme présenté à la section précédente (5.3), une distribution de probabilité a été associée à plusieurs de ces hypothèses de manière à tenir compte de l'incertitude qui leur est associée. Essentiellement, les paramètres non couverts par l'analyse d'incertitude, outre les données manquantes non comblées par des estimations, concernent la durée de vie, l'augmentation de la consommation des fluocompactes due au faible facteur de puissance, la valeur des COP, ainsi que la fraction de la chaleur créditée aux ampoules.

Le résultat des analyses de sensibilité réalisées sur les hypothèses est présenté aux paragraphes suivants.

5.4.1.1 Estimation des données manquantes

Les résultats sont peu sensibles aux estimations relatives à la consommation énergétique sur sites (types et quantités), à la gestion des déchets d'emballage et des ampoules en fin de vie, ainsi qu'à diverses distances de transport (ressources jusqu'aux sites de production, ampoules jusqu'aux ports d'expédition, ampoules jusqu'aux détaillants, ampoules et déchets d'emballage jusqu'aux lieux de gestion). En effet, l'attribution d'une valeur vraisemblable à ces paramètres, initialement supposés nuls, n'a pratiquement pas modifié les profils environnementaux des deux types d'ampoules.

Aucune analyse de sensibilité n'a par ailleurs été réalisée sur les paramètres non comblés par des estimations (supposés nuls). Il s'agit essentiellement de diverses ressources consommées et rejets générés aux étapes de production et de distribution des ampoules, ainsi que de leur transport entre les détaillants et la résidence des consommateurs. Cependant, ces paramètres ont potentiellement peu d'influence sur les résultats, sauf ceux ayant trait à l'étape de production (ressources et rejets non considérés). La complétude et la validité des données employées pour modéliser cette

étape sont en effet plutôt incertaines. Sa contribution relativement à l'étape d'utilisation pourrait donc être augmentée.

5.4.1.2 Hypothèses quant aux paramètres techniques

Comme mentionné au paragraphe 3.2.4.2, le faible facteur de puissance de la fluocompacte a été négligé a priori, bien qu'il puisse en augmenter la consommation énergétique de 5 à 7 %. Une augmentation de la consommation de plus de 10 % (17 W) ne modifie cependant pas les conclusions de l'ACV. Le dommage relatif associé au cycle de vie de la fluocompacte n'est alors que légèrement supérieur (il représente entre environ 30 et 35 % de celui de l'incandescence).

De la même manière, une durée de vie des ampoules fluocompactes de 5 000 heures, plutôt que 10 000, ne modifie pas les conclusions, bien qu'elle diminue l'écart des dommages associés aux deux types d'ampoules.

5.4.1.3 Choix des COP

Comme les dommages (et impacts) de la climatisation sont négligeables relativement à ceux du cycle de vie des ampoules, les conclusions ne sont normalement pas sensibles à la valeur du COP des systèmes de climatisation. Les profils environnementaux obtenus à partir de COP situés entre 1 et 10 confirment cette hypothèse.

En ce qui a trait aux systèmes de chauffage (gaz et mazout), les COP moyens semblent plutôt faibles comparativement aux valeurs actuellement retrouvées dans la littérature. Une augmentation des COP implique une diminution du crédit attribuable au chauffage évité et donc, une augmentation du dommage associé aux deux types d'ampoules. Les augmentations observées à partir de COP égaux à 1 ne modifient toutefois pas de façon sensible les profils environnementaux. La comparaison des systèmes fournis par ailleurs des conclusions similaires à celles obtenues préalablement, sauf pour le dommage à la santé humaine, pour lequel l'écart entre les deux types d'ampoules est légèrement supérieur. Ainsi, dans le cas du chauffage au gaz, cette catégorie de dommage favorise davantage la fluocompacte, alors que dans le cas du chauffage au mazout, elle favorise davantage l'incandescence.

5.4.1.4 Imputation du crédit pour le chauffage évité

Le fait qu'il soit supposé que l'éclairage des habitations soit entièrement assuré par l'un ou l'autre des deux types d'ampoules implique que le crédit environnemental pour le chauffage évité n'est attribué que pour une fraction (environ 60 %) des 10 000 heures d'éclairage considérées par l'unité fonctionnelle. Or, l'attribution d'un crédit pour le chauffage évité durant 10 000 heures d'utilisation (et donc, en considérant une utilisation des ampoules en saison froide uniquement), modifie légèrement les profils environnementaux obtenus de la manière suivante :

- Pour l'habitation chauffée à l'électricité, les conclusions sont les mêmes, bien que l'écart entre les deux types d'ampoules diminue (les dommages associés à la fluocompacte représentent alors entre environ 35 et 85 % de ceux associés à l'incandescence) ;

- Pour l'habitation chauffée au gaz naturel, l'écart entre les deux types d'ampoules varie peu ou pas, sauf pour le dommage à la santé humaine, pour lequel l'ampoule incandescente devient clairement favorable. Comme cette catégorie de dommage favorisait initialement l'ampoule fluocompacte, ce résultat augmente l'intérêt de l'utilisation d'incandescentes en saison froide pour une habitation chauffée au gaz.
- Pour l'habitation chauffée au mazout, l'écart entre les deux types d'ampoules varie de façon similaire à celui de l'habitation chauffée au gaz. Dans ce cas, cependant, la contribution relative de l'incandescente au dommage à la santé humaine ne diminue que légèrement.

5.4.2 Choix des données génériques

L'évaluation de la sensibilité des résultats au choix des données génériques devrait prioriser les éléments potentiellement plus sensibles, c.-à-d. dont les données sont de moins bonne qualité et/ou dont la contribution à l'impact potentiel semble plus importante. Comme indiqué au Tableau 5-5, ces éléments devraient viser les modules de données employés pour quantifier, outre l'étape de production (dont la complétude et la validité sont plutôt incertaines), l'étape d'utilisation (processus et paramètres identifiés au Tableau 5-2).

Dans le cadre de la présente étude, l'effet du mélange énergétique (*grid mix*) alimentant les ampoules pendant l'utilisation a été évalué. D'une part, les achats d'électricité (notamment produite au charbon) ont été retirés du mélange québécois, de manière à évaluer l'effet des importations au sein du réseau (hypothèse d'un système entièrement fermé). À l'opposé, de manière à considérer le fait que les réseaux électriques nord-américains sont plus ou moins inter-reliés, le mélange québécois a, d'autre part, été remplacé par le mélange nord-américain moyen (hypothèse d'un système entièrement ouvert).

5.4.2.1 Effet des importations d'électricité au sein du réseau québécois

Le retrait des achats d'électricité (autres que l'hydroélectricité) du *grid mix* québécois modifie la contribution relative des divers systèmes de production et de transmission de l'électricité, mais ne modifie pas les conclusions générales quant à l'alternative la plus favorable. La consommation d'électricité à l'étape d'utilisation demeure le principal contributeur au cycle de vie des deux types d'ampoules.

5.4.2.2 Effet du mélange énergétique nord-américain

L'utilisation du mélange nord-américain, majoritairement basé sur le charbon et le gaz naturel, modifie clairement les conclusions obtenues. Dans ce cas, le crédit accordé à l'effet croisé de la chaleur émise sur les systèmes de chauffage au gaz et au mazout n'est plus suffisant pour compenser les dommages associés au scénario de base. L'ampoule fluocompacte devient alors l'option la plus avantageuse pour tous les scénarios d'étude, le dommage lui étant associé représentant entre 20 et 25 % de celui associé aux incandescentes (pour tous les scénarios). Seules quelques catégories d'impacts demeurent ainsi favorables à l'incandescente, soient la détérioration de la couche d'ozone (pour le chauffage au gaz et au mazout), de même que l'oxydation photochimique et l'eutrophisation aquatique (pour le chauffage au mazout seulement). À titre indicatif, la Figure 5-11 présente les résultats obtenus pour le cas du chauffage selon la répartition moyenne au Québec.

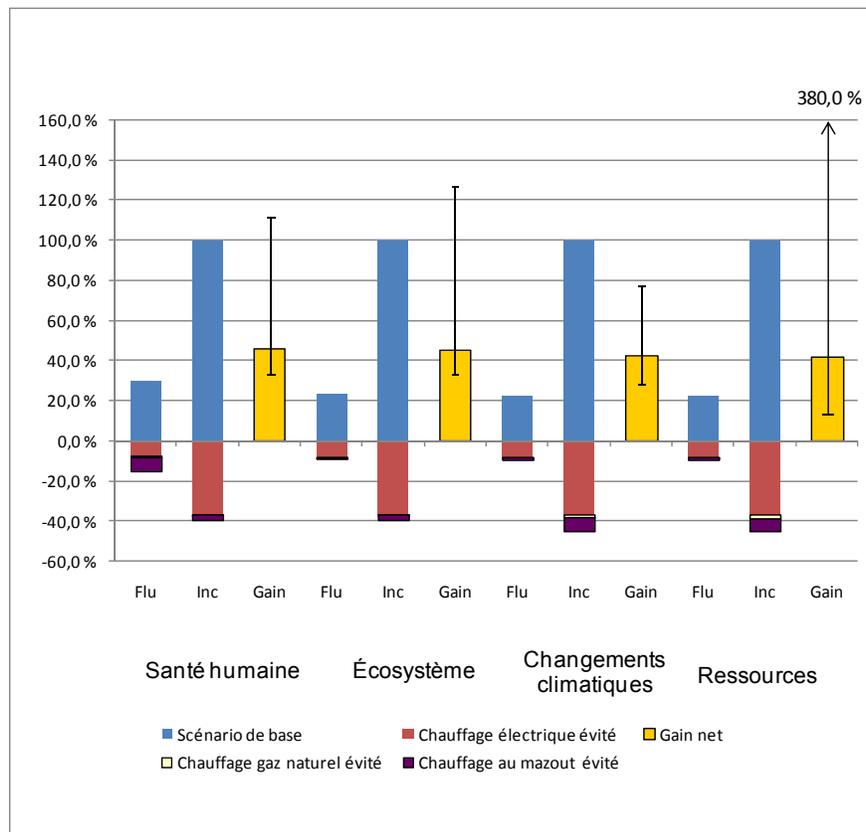


Figure 5-11 : Dommages associés au scénario « effet croisé » selon la répartition moyenne des types de chauffage au Québec, dans un contexte énergétique nord-américain.

Ces résultats montrent l'importance de considérer les conséquences possibles de privilégier un type d'ampoule plutôt qu'un autre. L'utilisation d'ampoules incandescentes, même en saison froide dans les habitations chauffées au gaz et au mazout, n'est effectivement pas la solution à favoriser dans un contexte énergétique nord-américain (c.-à-d. dans un système ouvert, où les variations de consommation d'une région ont un effet sur les consommations dans une autre région). En d'autres termes, l'économie d'énergie associée à la substitution des ampoules incandescentes par des fluocompactes est aussi à favoriser lorsqu'elle peut être utilisée/exportée pour remplacer une production électrique d'origine thermique (ou, plus globalement, un mélange électrique ayant une efficacité inférieure à celle des systèmes de chauffage au gaz et au mazout).

5.4.3 Comparaison de méthodes ÉICV

Comme présenté (à la sous-section 3.2.6), il a été décidé d'établir l'ÉICV sur la méthode IMPACT 2002+ et de vérifier la sensibilité des résultats au choix de la méthode d'évaluation (en comparant avec les résultats obtenus à partir de LUCAS).

Quoiqu'IMPACT 2002+ soit moins bien adaptées au contexte canadien que LUCAS, ceci ne génère pas d'incohérence scientifique pour les impacts ayant des répercussions à l'échelle globale et dont les modèles d'évaluation sont les mêmes quel que soit le lieu

d'émission ou d'extraction des ressources (réchauffement global, appauvrissement de la couche d'ozone, utilisation des ressources abiotiques et de l'eau). Les conditions environnementales du milieu influençant toutefois les catégories d'impacts régionales (smog photochimique, eutrophisation, acidification) et locales (toxicité humaine, écotoxicité, utilisation des terres), les modèles de caractérisation utilisés pour ces impacts doivent normalement prendre en compte les caractéristiques du milieu récepteur. L'application de plus d'une méthode ÉICV permet donc de vérifier si la variabilité des milieux récepteurs et des modèles de caractérisation a une influence significative sur les conclusions.

Les résultats d'indicateur de catégorie obtenus à partir de LUCAS favorisent, selon les scénarios et les catégories d'impact, toujours le même type d'ampoules que ceux obtenus à partir d'IMPACT 2002+, à l'exception des effets cancérigènes dans le cas d'habitations chauffées au mazout. Dans ce dernier cas, IMPACT 2002+ favorise l'incandescence, alors que LUCAS favorise la fluocompacte.

5.5 Limites de l'AICV et de l'ÉICV

Les limites de l'analyse de l'inventaire sont essentiellement liées au caractère incomplet et plus ou moins valides de l'inventaire lui-même. En effet, plusieurs processus initialement inclus dans le cycle de vie des ampoules ont dû être exclus ou estimés durant la collecte des données, principalement par manque d'informations les concernant. Or, l'inclusion et/ou l'augmentation de la représentativité de ces processus dans l'inventaire modifierait assurément les résultats de l'analyse, mais probablement pas au point d'en inverser les conclusions. En effet, les processus exclus et estimés sont essentiellement les mêmes pour les deux systèmes et/ou concernent des éléments qui semblent avoir peu d'influence sur les résultats (suite aux analyses de contribution et de sensibilité). À titre indicatif, le Tableau 5-5 présente des indicateurs de la qualité des données ayant servi à l'ACV. Cette évaluation permet de juger de la fiabilité des données en liaison avec leur influence potentielle sur les résultats obtenus (en termes de contribution à l'impact). Les critères employés pour la qualification des données sont précisés au Tableau 5-6.

Tableau 5-5 : Qualification des données

Flux intermédiaire	Contribution potentielle à l'impact	Qualité des données	
		Quantité	Processus
1- Production			
<i>Matériaux</i>			
Paroi : verre	3	2	3
Revêtement : phosphore	3	2	4
Revêtement : silice	3	2	4
Gaine métallique : fer blanc	3	2	3
Branches de connexion : cuivre	3	2	3
Contact électrique : cuivre	3	2	3
Soudure (avec ou sans plomb)	3	2	3
Plomb (soudure)	3	2	na
Isolant : verre noir	3	2	4
Base : PVC ou PBT	3	2	3-4

Tableau 5-5 : Qualification des données

Flux intermédiaire	Contribution potentielle à l'impact	Qualité des données	
		Quantité	Processus
Ballast électronique	5	2	3-4
Tige : verre	3	2	3
Filament : tungstène	3	2	3
Filage interne: cuivre	3	2	3
Colle : non précisée	3	2	5
Argon	3	2	4
Mercure	3	2	4
Azote	3	2	4
Carton	3	2	3
Autres ressources (non précisées)	3	5	5
<i>Énergie</i>			
Transport – matières premières	1	4	3
Chaleur – Huile & Gaz	3	4	3
Électricité	3	4	2
Transport – déchets de production	1	5	5
<i>Déchets et émissions</i>			
Rejets de production (non précisés)	3	5	5
2- Distribution			
<i>Énergie</i>			
Transport par camion	1	2	3
Transport transocéanique	1	1	1
Transport par train	1	1	2
Transport par camion	1	2	2
Consommation d'énergie pour la manutention et l'entreposage	1	5	5
<i>Déchets (emballage)</i>			
Emballage secondaire et tertiaire, s'il y a lieu	1	5	5
3- Utilisation			
<i>Énergie</i>			
Transport – Ampoules vers consommateurs	1	5	5
Électricité	5	1	2
Transport – Déchets	1	4	2
<i>Déchets (emballage)</i>			
Carton (67% enfoui; 33% recyclé)	1	1	3
4- Fin de vie			
<i>Énergie</i>			
Transport – Déchets	1	4	2
<i>Déchets (ampoules)</i>			
Base de plastique (enfouie)	1	1	3
Autres composantes (enfouies)	1	1	4
<i>Émissions</i>			
Mercure (air)	1	4	na
Plomb (eau)	1	4	na
Note : La qualité des données « quantités » fait référence à la fiabilité des quantités de matière et d'énergie inventoriées, de même que des distances de transport et des quantités de rejets selon leur devenir (flux intermédiaires primaires). La qualité des données « processus » fait plutôt référence à la validité géographique et technologique des modules de données génériques sélectionnés (flux intermédiaires et élémentaires secondaires). Enfin, la contribution potentielle à l'impact fait réfère à l'influence potentielle de la donnée sur les résultats (à la lumière des résultats d'analyses de contribution et de sensibilité).			

Tableau 5-6 : Critères de qualification des données

Pointage	Critères de qualification des données « quantités »
1	Données spécifiques plutôt fiables ou informations peu variables entre les manufacturiers
2	Données spécifiques plutôt incertaines ou informations variables entre les manufacturiers
3	Données estimées à partir d'autres sources
4	Données estimées de manière grossière
5	Données manquantes
Pointage	Critères de qualification des données « processus »
1	Donnée de terrain, ou donnée générique ayant une bonne représentativité géographique et technologique du processus sélectionné.
2	Donnée générique en partie adaptée au contexte énergétique et/ou technologique.
3	Donnée incomplète (le processus n'est représenté que partiellement) ou ayant une représentativité géographique et technologique inconnue.
4	Donnée ayant une représentativité géographique ou technologique inadéquate. La donnée n'est pas facilement accessible, utilisation d'un autre processus comme approximation (proxy).
5	Données manquantes.
Pointage	Critères de qualification de la contribution potentielle à l'impact
1	Contribution potentiellement faible ou négligeable (c.-à-d. sans influence sur les résultats).
3	Contribution potentiellement influente.
5	Forte contribution potentielle.

Les résultats présentés aux sections précédentes (5.1 à 5.3) sont par ailleurs issus des calculs réalisés en utilisant essentiellement les modèles de la méthode d'évaluation des impacts IMPACT 2002+. Les dommages (et impacts) évalués ne sont que des dommages (et impacts) potentiels puisqu'ils correspondent à une modélisation, donc à une simplification, de l'environnement réel. Les résultats de l'ÉICV sont des expressions relatives qui ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, des marges de sécurité ou les risques. À ce titre, ces résultats ne doivent pas constituer l'unique base d'affirmation comparative destinée à être divulguée au public, dans la mesure où des informations supplémentaires seraient nécessaires pour remédier à certaines des limitations propres à l'ÉICV.

Plus important encore est le fait que l'interprétation des résultats de la caractérisation ne peut se baser que sur les résultats obtenus, c'est-à-dire sur les substances pour lesquelles il existe, dans la banque de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en indicateurs d'impacts et de dommage. Or plusieurs flux élémentaires (357) n'ont pu être convertis en résultats d'indicateur de catégorie puisqu'aucun facteur de caractérisation n'était disponible. Ils n'ont donc pas été considérés lors de l'évaluation des impacts et des dommages. Il faut aussi mentionner que ces flux élémentaires non caractérisés sont les mêmes pour les deux types d'ampoules et que la majorité affiche une diminution avec l'utilisation d'ampoules fluocompactes (plus de 90 % pour le scénario de base et pour le cas du chauffage électrique ; plus de 80 % pour le chauffage au gaz ; plus de 65 % pour le chauffage au mazout). Les impacts qui leur sont associés et qui seraient évalués si des facteurs de caractérisation étaient disponibles suivent donc la même tendance, ce qui viendrait soit appuyer (dans le cas du scénario de base et du chauffage électrique) soit inverser (dans le cas du chauffage au gaz et au mazout) les conclusions obtenues.

6. CONCLUSION

Ce projet visait d'une part à d'établir le profil environnemental des ampoules fluocompactes et incandescentes utilisées au Québec et d'en identifier les « points chauds ». Il visait aussi à identifier sous quelles conditions une alternative est préférable à l'autre considérant l'effet croisé de la chaleur dégagée durant l'utilisation des ampoules. Ces gains de chaleur à l'intérieur des habitations constituent effectivement une réduction de charge pour les systèmes de chauffage.

6.1 Profil environnemental des ampoules fluocompactes et incandescentes

À la lumière des résultats obtenus, l'étape d'utilisation domine le cycle de vie des deux types d'ampoules, suivie de l'étape de production. Cette dernière est responsable de 6 à 30 % des dommages potentiellement associés au cycle de vie de la fluocompacte, alors qu'elle n'en représente que 1 à 5 % dans le cas de l'incandescente. La distribution et la fin de vie s'avèrent quant à elles négligeables dans les deux cas.

L'utilisation, qui représente entre 69 et 93 % des potentiels de dommages dans le cas de la fluocompacte et entre 93 et 99 % dans le cas de l'incandescente est dominée par la consommation d'électricité. Cette dernière est quant à elle dominée, selon les catégories de dommage, soit par la production même de l'électricité (notamment dû aux faibles quantités achetées et produites à partir de charbon et de gaz industriel) soit par sa transmission (production de cuivre et émissions au sol de cuivre et de chrome VI associées à l'infrastructure des réseaux).

6.2 Conditions favorisant une alternative comparativement à l'autre, considérant l'effet croisé de la chaleur...

Lorsqu'on considère les bénéfices environnementaux de l'effet croisé de la chaleur dégagée durant l'utilisation des ampoules, il est aussi nécessaire de considérer les conséquences possibles, à une échelle plus globale, de privilégier un type d'ampoule plutôt qu'un autre. Plus particulièrement, un remplacement d'ampoules incandescentes par des fluocompactes entraînerait des économies d'électricité pouvant être employées à d'autres fins que l'éclairage. L'utilisation réservée à ces économies d'électricité permet d'identifier plus adéquatement le type d'ampoule devant être favorisé.

...dans un contexte énergétique québécois

Si l'électricité économisée n'est pas employée à d'autres fins (et donc, si on peut considérer qu'un surplus d'eau coule du barrage sans être turbiné), l'utilisation du mélange énergétique québécois comme hypothèse de base pour évaluer les impacts de l'électricité est justifiée. La comparaison des profils environnementaux obtenus pour les deux types d'ampoules favorise alors l'une ou l'autre des alternatives selon les conditions d'éclairage. L'ampoule fluocompacte s'avère ainsi être un choix plus convenable que l'incandescente :

- Lorsqu'il n'y a pas d'effet croisé possible, c.-à-d. en saisons chaude ou neutre (environ 45 % de l'année) et en saison froide pour les habitations chauffées au bois (9 % des habitations québécoises) ou dont l'isolation est déficiente (et que le point de consigne du thermostat n'est jamais atteint) ; et
- Lorsque le crédit environnemental dû à l'effet croisé n'est pas suffisant pour compenser les dommages associés au cycle de vie des ampoules, c.-à-d. en saison froide pour les habitations chauffées à l'électricité (68 % des habitations).

Dans ce cas, on observe en effet une diminution, avec l'utilisation de la fluocompacte, de tous les résultats d'indicateur de dommage, sauf pour :

- L'étape de production (augmentation de tous les indicateurs) ;
- La qualité des écosystèmes en fin de vie.

Ainsi, malgré que l'ampoule fluocompacte soit souvent moins dommageable que l'incandescente sur l'ensemble de son cycle de vie, ses étapes de production et de fin de vie devraient être améliorées, plus particulièrement en ce qui a trait aux composantes électroniques et au mercure qu'elle contient. Des résultats d'ACV permettraient de quantifier les améliorations potentielles associées à diverses options d'amélioration, notamment l'utilisation de ballasts modulaires (c.-à-d. non intégrés et donc, réutilisables) et la récupération/recyclage des ampoules en fin de vie.

Enfin, les résultats ont montrés que l'utilisation des incandescentes pouvait tout de même être avantageuse en saison froide (environ 55 % de l'année) dans les habitations chauffées au gaz et au mazout (23 % des habitations au Québec), en particulier en ce qui concerne les dommages relatifs aux changements climatiques et à l'utilisation des ressources. Ainsi, bien que l'avantage potentiel de l'incandescente ne soit pas clairement ressorti concernant les dommages à la qualité des écosystèmes et à la santé humaine, la promotion à grande échelle de l'ampoule fluocompacte devrait être évitée dans un contexte énergétique québécois.

...dans un contexte énergétique plus global

Si, par contre, les surplus d'électricité permettent de substituer une forme d'énergie ayant une efficacité inférieure à celle d'un système de chauffage au gaz ou au mazout (en particulier l'électricité d'origine thermique), l'ampoule fluocompacte est à privilégier pour tous les types de chauffage. Selon les résultats de l'analyse de sensibilité, en effet, l'utilisation d'ampoules incandescentes est de 4 à 5 fois plus dommageable que celle d'ampoules fluocompactes dans un contexte énergétique nord-américain (c.-à-d. dans un système ouvert, où les variations de consommation d'une région ont un effet plus ou moins direct sur les consommations dans une autre région). Dans ce contexte, il semble donc plus optimal de privilégier l'emploi d'ampoules fluocompactes à grande échelle, de manière à favoriser globalement l'efficacité énergétique.

La présente analyse devrait donc être affinée selon une approche axée sur les conséquences (ou ACV conséquentielle). Ceci permettrait de quantifier les écarts de performance environnementale entre les deux types d'ampoule dans un contexte énergétique nord-américain et considérant les diverses conséquences possibles éventuellement associées aux économies d'énergie à l'échelle québécoise.

7. RÉFÉRENCES

- BARE, J.C., NORRIS, G.A., PENNINGTON, D.W. et MCKONE, T. (2003). TRACI - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental. Journal of Industrial Ecology 6(3-4) pp.4-78.
- BIO INTELLIGENCE SERVICE (2003). Study on External Environmental Effects Related to the Life Cycle of Products and Services, Report prepared for the European Commission, Appendix 2, pp. 23-27
[En ligne] http://ec.europa.eu/environment/ipp/pdf/ext_effects_appendix2.pdf
- HILKENE, C., FRIESEN, K. (2005). Background Study on Increasing Recycling of End-of-life Mercury-containing Lamps from Residential and Commercial Sources in Canada, Pollution Probe, 97 p.
- HYDRO-QUEBEC DISTRIBUTION (2007). Analyse de l'environnement – éclairage résidentiel, Document préparé par Hydro-Québec Distribution, Direction principale – Efficacité énergétique, marketing et ventes – Grande entreprise, Avril 2007, 108 p.
- ISO 14 040 (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, 24 p.
- ISO 14 044 (2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, Organisation internationale de normalisation, 56 p.
- JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G. et ROSENBAUM, R. (2003). IMPACT 2002+ : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. International Journal of LCA 8(6) pp.324-330.
- JOLLIET, O., SAADE, M. et CRETAAZ, P. (2005). Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan. Presses polytechniques et universitaires romandes, 242 p.
- MARCON-DDM (2006). Étude 2006 sur les luminaires au fluorescent et les ampoules fluorescentes chez les détaillants, Étude réalisée pour Hydro-Québec, 22 p.
- NLPIP (1999). Screwbase Compact Fluorescent Lamp Products: Energy-efficient Alternatives to Incandescent Lamps, National Lighting Product Information Program (NLPIP), Specifier Reports 7(1), 79 p.
[En ligne] http://www.lightingresearch.org/programs/NLPIP/PDF/VIEW/SR_SB_CFL.pdf.
- PARSONS (2006). The Environmental Impact of Compact Fluorescent Lamps and Incandescent Lamps for Australian Conditions, The Environmental Engineer, Journal of the Society for Sustainability and Environmental Engineering, Institution of Engineers, Australia, Vol. 7 No. 2, pp.8-14.
- RESSOURCES NATURELLES ET FAUNES QUÉBEC (2005). Portrait du recyclage des papiers et cartons récupérés par l'industrie des pâtes et papiers, p. 4
[En ligne] <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/recyc-papiers-cartons.pdf>
- SAFE (2003). Messprojekt „Sparlampen im Test“ Auswertung nach 6'000 Betriebsstunden, Schweizerische Agentur für Energieeffizienz (SAFE – Agence suisse pour l'efficacité énergétique), 21 p.
- SETAC (1997). Simplifying LCA: Just a Cut?., Final Report from the SETAC-Europe (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), LCA Screening and Streamlining Working Group, 53 p.
- SSEE (2006). The Environmental Impact of Compact Fluorescent Lamps and Incandescent Lamps for Australian Conditions, Society for Sustainability and Environmental Engineering (SSEE), Institution of Engineers, Australia.

TOFFOLETTO, L., BULLE, C., GODIN, J., REID, C. et DESCHÊNES, L. (2005). LUCAS - A new LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. International Journal of LCA on line first p.10.

US DOE (2005). How Compact Fluorescents Compare with Incandescents, United States Department of Energy
[En ligne] <http://www.eere.energy.gov/>

US EPA (2000). High Efficiency Lighting – Appliance/lighting Improvement, United States Environmental Protection Agency (EPA 430-F-97-028)
[En ligne] http://www.energystar.gov/ia/new_homes/features/HighELighting1-17-01.pdf

Appels téléphoniques et échanges par courrier électronique

LEE, E. (2007a). Discussion téléphonique avec Éliane Lee, Direction efficacité énergétique et services, Hydro-Québec.

LEE, E. (2007b). Fichier Excel reçu par courrier électronique d'Éliane Lee, Direction efficacité énergétique et services, Hydro-Québec.

OLIVIER, G. (2007). Discussion téléphonique avec le Pr Guy Olivier, professeur titulaire au département de génie électrique, École Polytechnique de Montréal.

PARENT, M. (2007). Discussion téléphonique avec Michel Parent, ingénieur en mécanique, Groupe conseil Technosim.

RECYC-QUÉBEC (2007). Discussion téléphonique avec Mario Laquerre, personne-ressource pour les statistiques sur le taux de recyclage des ampoules au Québec.

ANNEXE A : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

Le contenu de cette annexe est compris dans le fichier suivant :
« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_A »

ANNEXE B : MÉTHODES D'ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE (ÉICV)

Le contenu de cette annexe est compris dans les fichiers suivants :
« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_B » et
« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_B-2 »

ANNEXE C: DONNÉES, HYPOTHÈSES ET RÉSULTATS

Le contenu de cette annexe est compris dans le fichier suivant :
« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_C »

**ANNEXE D: RAPPORT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE ET RÉPONSES DU
CIRAIG AU COMITÉ**

Le contenu de cette annexe est compris dans les fichiers suivants :

« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_D-1 » et

« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_D-2 »

ANNEXE E: FICHE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE ACV

Le contenu de cette annexe est compris dans le fichier suivant :
« Pi33_Rptfin_2008-04-24_Annexe_E »