



CIRAIG^{MC}

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



RAPPORT TECHNIQUE

COMPARAISON DES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ET DES BOUQUETS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

NOVEMBRE 2014

Préparé pour

Hydro-Québec

Unité environnement et développement durable
Direction principale – Environnement et Affaires corporatives
75 boul. René-Lévesque ouest, 2^e étage
Montréal (Québec) H2Z 1A4



CHAIRE INTERNATIONALE
SUR LE CYCLE DE VIE



UQAM



PARTENAIRES DE LA CHAIRE INTERNATIONALE SUR LE CYCLE DE VIE



Chaire internationale sur le cycle de vie

Polytechnique Montréal
Département de génie chimique
2900, Édouard-Montpetit
Montréal (Québec) Canada
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
H3C 3A7

www.chaire-cycledevie.org

Rapport soumis par :

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

Université de Montréal Campus
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
Montréal (Québec) H3C 3A7

Ce rapport a été préparé par la Chaire internationale sur le cycle de vie (Chaire ICV), unité de recherche principale du Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services de Polytechnique Montréal (CIRAIG) et de l'École des sciences de la gestion de l'UQAM (ESG-UQAM).

La Chaire ICV a démarré ses activités de recherche le 1^{er} janvier 2012. Elle est dirigée par quatre co-titulaires issus de Polytechnique Montréal et de l'École des sciences de la gestion de l'UQAM, alliant l'ingénierie et les sciences sociales. Elle rassemble 13 partenaires industriels leaders en matière de développement durable : ArcelorMittal, Bombardier, le Mouvement Desjardins, Hydro-Québec, LVMH, Michelin, Nestlé, RECYC-QUÉBEC, SAQ, Solvay, Total, Umicore et Veolia. La Chaire ICV demeure à ce jour un des plus importants investissements privés dans la recherche en cycle de vie à l'échelle mondiale.

AVERTISSEMENT

À l'exception des documents entièrement réalisés par le CIRAIG ou l'ESG-UQAM, tel que le présent rapport, toute utilisation du nom de la Chaire ICV, du CIRAIG, de Polytechnique Montréal ou de l'ESG-UQAM lors de communication destinée à une divulgation publique associée à ce projet et à ses résultats doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du CIRAIG, de Polytechnique Montréal ou de l'ESG-UQAM.

Équipe de travail

Réalisation

Pablo Tirado-Seco, analyste



Recherche, analyse et réalisation de l'ACV du kWh d'Hydro-Québec

Geneviève Martineau, analyste senior



Rédaction, Contrôle qualité

Collaboration

Sophie Fallaha, M. Sc.A.

Directrice des relations industrielles de la Chaire ICV Coordination du projet

François Saunier, analyste

Contrôle qualité

Direction

Réjean Samson, Directeur général, CIRAIG-Poly
Titulaire principal, Chaire ICV



Direction scientifique

Sommaire de l'étude

L'électricité pouvant être produite selon différents modes, ses impacts environnementaux varient selon les filières de production. Dans l'optique d'améliorer sa compréhension des enjeux qui y sont associés, Hydro-Québec a mandaté le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) pour réaliser une étude comparative des impacts environnementaux de différentes filières de production d'électricité et également des bouquets d'énergie électrique¹ de plusieurs régions du monde. Cette étude est basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV). L'ACV est une méthodologie permettant d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur une partie ou la totalité de son cycle de vie. Dans le cadre de la présente étude, les consommations et émissions associées aux étapes d'extraction des matières premières jusqu'à celles de production (dans le cas des filières) et de distribution de l'électricité (dans le cas des bouquets) ont été compilées et converties en impacts environnementaux.

Comparaison des filières de production d'électricité

Les données relatives aux impacts de différentes filières de production d'électricité ont été récoltées à l'aide d'une revue bibliographique des ACV réalisées dans ce domaine. Elles concernaient la production d'électricité par des filières thermiques non renouvelables (gaz naturel, charbon, mazout ou nucléaire) ou renouvelables (hydroélectricité, solaire, éolien ou biomasse). Plus de soixante rapports ou articles, publiés depuis 2007 et représentatifs du contexte de l'étude, ont été recensés et analysés. Les données recueillies ont aussi été comparées à celles obtenues lors d'une précédente étude réalisée par le CIRAIG pour Hydro-Québec sur les impacts de l'électricité produite, transportée et distribuée en 2012 par Hydro-Québec.

Il en ressort, pour les sept indicateurs d'impacts environnementaux étudiés², que les filières de production hydroélectrique d'Hydro-Québec présentent des résultats parmi les meilleurs par rapport à l'ensemble des filières à l'étude du fait de leur faible utilisation de ressources pendant la phase de production. À l'inverse, les filières thermiques non renouvelables présentent les résultats les moins performants, du fait de l'extraction, de la transformation et de l'utilisation des combustibles. Il convient de noter qu'au sein d'une même filière, les résultats peuvent varier fortement selon les technologies et les combustibles considérés, en particulier pour les filières thermiques et à biomasse. Par ailleurs, les résultats obtenus dans l'étude de référence d'Hydro-Québec sont similaires, pour la plupart des indicateurs, à ceux relevés dans la littérature pour les filières hydroélectriques. Les quelques différences observées proviennent de variations dans les hypothèses posées entre les études.

¹ Dans ce rapport, bouquet d'énergie électrique est compris comme l'ensemble de filières électriques, correspondant aux centrales en opération sur le territoire, de même qu'aux achats de producteurs privés et aux importations de territoires voisins (aussi nommé *grid mix*).

² Seuls les indicateurs d'impacts environnementaux pour lesquels un nombre suffisant de données étaient disponibles ont été retenus pour la comparaison des filières : le *Changement climatique*, la *Destruction de la couche d'ozone*, l'*Acidification*, l'*Eutrophisation*, la *Toxicité humaine*, l'*Utilisation des ressources* et l'*Oxydation photochimique*.

Comparaison de bouquets d'énergie électrique

La comparaison des bouquets d'énergie électrique a, quant à elle, été effectuée à partir de données issues de *ecoinvent* v3.0, une base de données couramment utilisée en ACV. Elles concernent à la fois des provinces canadiennes, des États américains et quelques autres pays choisis par Hydro-Québec. Elles ont été comparées sur la base de quatre indicateurs d'impacts environnementaux couramment utilisés : le *Changement climatique*, la *Santé humaine*, la *Qualité des écosystèmes* et l'*Utilisation des ressources*. Il en résulte que le kilowattheure électrique distribué au Québec se situe parmi les approvisionnements électriques ayant les meilleurs résultats. Il se compare aux autres régions ayant des bouquets d'énergie électrique comprenant une forte part d'hydroélectricité, comme ceux du Manitoba et de la Norvège. Plus généralement, les régions dont les bouquets sont alimentés d'une forte part d'énergies renouvelables présentent globalement des profils avantageux tandis que celles ayant une importante part d'énergies fossiles (charbon et/ou gaz naturel, comme dans le cas de la Chine ou de certaines régions des États-Unis) présentent les profils les moins avantageux.

Table des matières

ÉQUIPE DE TRAVAIL	IV
SOMMAIRE DE L'ÉTUDE	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	XI
1 MISE EN CONTEXTE.....	1
2 DESCRIPTION DES FILIÈRES ET DES BOUQUETS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	2
2.1 Filières de production électrique	2
2.1.1 Filières de production électriques issues de sources renouvelables	2
2.1.2 Filières de production issues de sources non renouvelables	4
2.2 Bouquets d'énergie électrique	5
3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	11
3.1 Analyse du cycle de vie.....	11
3.1.1 Méthodes d'évaluation des impacts	12
3.1.2 Indicateurs environnementaux	14
3.2 Recherche bibliographique.....	16
4 L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU KWH D'HYDRO-QUÉBEC.....	17
4.1 Phase 1 : Définition du système étudié	17
4.2 Phase 2 : Inventaire du cycle de vie (collecte de données).....	18
4.3 Phase 3 : Évaluation des impacts du cycle de vie (résultats)	19
4.3.1 Bouquet d'énergie électrique du Québec	19
4.3.2 Filières de production hydroélectrique d'Hydro-Québec	21
5 PRÉSENTATION DES FICHES COMPARATIVES	24
5.1 Indicateurs environnementaux retenus pour la comparaison.....	24
5.2 Comparaison des filières de production électrique	26
6 RÉFÉRENCES	32
6.1 Références générales	32
6.2 Fiche comparative — <i>Changement climatique</i>	34
6.3 Fiche comparative — <i>Destruction de la couche d'ozone</i>	38
6.4 Fiche comparative — <i>Acidification</i>	40
6.5 Fiche comparative — <i>Eutrophisation</i>	42

6.6	Fiche comparative — <i>Toxicité humaine</i>	45
6.7	Fiche comparative — <i>Épuisement des ressources</i>	46
6.8	Fiche comparative — <i>Oxydation photochimique (Smog)</i>	48
ANNEXE A : FICHES COMPARATIVES		51
ANNEXE B : GLOSSAIRE		53
ANNEXE C : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE		56
C.1	Recensement des références bibliographiques	57
C.2	Tri des références	58
C.3	Compilation des résultats existants	58

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Composition des bouquets d'énergie électrique des provinces canadiennes étudiées (2008 - 2012).....	7
Tableau 2-2 : Composition des bouquets d'énergie électrique des régions électriques de l'Amérique du Nord (portion États-Unis seulement) (2008).....	8
Tableau 2-3 : Composition des bouquets de production électrique de certains États du Nord-Est américain et du Québec (Hydro-Québec et Québec) en 2012.....	9
Tableau 2-4 : Composition des bouquets d'énergie électrique moyens de divers pays (2008)	10
Tableau 3-1 : Méthodes d'évaluation des impacts	14
Tableau 3-2 : Indicateurs environnementaux utilisés par les méthodes CML et IMPACT 2002+ ..	15
Tableau 5-1 : Liste des fiches comparatives des filières de production et des bouquets d'énergie électrique.....	26
Tableau 5-2 : Références utilisées pour quantifier les impacts environnementaux potentiels des filières de production électrique	28
Tableau C-1 : Bases de données et moteurs de recherche disponibles.....	57

Liste des figures¹

Figure 2-1 : Régions électriques de l'Amérique du Nord : les huit conseils régionaux de la NERC..	6
Figure 3-1 : Illustration des différentes étapes prises en compte en ACV.....	11
Figure 3-2 : Schéma des étapes de l'analyse du cycle de vie.	13
Figure 4-1 : Résultats des indicateurs <i>Santé humaine</i> , <i>Qualité des écosystèmes</i> et <i>Changement climatique</i> associés à la production et l'achat, le transport et la distribution de 1 kWh d'électricité au Québec, par le réseau principal d'Hydro-Québec, en 2012 (méthode IMPACT World+).	19
Figure 4-2 : Résultats des indicateurs <i>Utilisation d'énergies fossiles</i> et <i>Extraction de ressources minérales</i> associés à la production et l'achat, le transport et la distribution de 1 kWh d'électricité au Québec, par le réseau principal d'Hydro-Québec, en 2012 (méthode IMPACT World+).	20
Figure 4-3 : Contribution relative des éléments des centrales à réservoir d'Hydro-Québec (méthode CML).....	22
Figure 4-4 : Contribution relative des éléments des centrales au fil de l'eau d'Hydro-Québec (méthode CML).....	23

¹ Étant donné que la numérotation est différente, les figures des fiches comparatives ne sont pas incluses dans cette liste.

Liste des abréviations et sigles

ACV	Analyse du cycle de vie
Bq éq. ¹⁴ C	Becquerel équivalent carbone 14
CFC	Chlorofluorocarbures
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
DALY	« <i>Disabled Adjusted Life Years</i> », année équivalente de vie perdue
DEP	Déclaration environnementale de produit (EPD en anglais)
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie (appelé ACVI par ISO)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
ICV	Inventaire du cycle de vie
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (GIEC en français)
ISO	Organisation internationale de normalisation
kg éq. 1,4-DB	Kilogramme équivalent de dichlorobenzène
kg éq. CFC-11	Kilogramme équivalent de trichlorofluorométhane
kg éq. C ₂ H ₄	Kilogramme équivalent d'éthylène
kg éq. C ₂ H ₃ Cl	Kilogramme équivalent de chloroéthylène
kg éq. CO ₂	Kilogramme équivalent de dioxyde de carbone
kg PM _{2,5}	Kilogramme de particules fines (diamètre inférieur à 2,5 micromètres)
kg éq. PO ₄	Kilogramme équivalent de phosphate
kg éq. Sb	Kilogramme équivalent d'antimoine
kg éq. SO ₂	Kilogramme équivalent de dioxyde de soufre
m ² éq. arable	Mètre carré équivalent de terre arable
MJ	Mégajoule d'énergie
PDF*m ² *an	« <i>Potentially Disappeared Fraction</i> », fraction d'espèces potentiellement disparues sur une surface donnée et durant une certaine période de temps
PRG	Potentiel de réchauffement global (GWP en anglais)
TAC	Turbine à combustion
TEG	Triéthylène glycol

Codes des pays et régions

AB	Alberta (Canada)	NH	New Hampshire (États-Unis)
AR	Argentine	NL	Pays-Bas
AT	Autriche	NO	Norvège
BE	Belgique	NPCC	<i>Northeast Power Coordinating Council</i> (États-Unis)
BT	Bhoutan	NS	Nouvelle-Écosse (Canada)
CA	Canada	NY	New York (États-Unis)
CH	Suisse	ON	Ontario (Canada)
CT	Connecticut (États-Unis)	PL	Pologne
CZ	République tchèque	PT	Portugal
DE	Allemagne	PY	Paraguay
DK	Danemark	QC	Québec (Canada)
EE	Estonie	RFC	<i>Reliability First Corporation</i> (États-Unis)
ERCOT	<i>Electric Reliability Council of Texas</i> (ou TRE) (États-Unis)	RI	Rhode Island (États-Unis)
ES	Espagne	RU	Russie
FI	Finlande	SE	Suède
FR	France	SERC	<i>SERC Reliability Corporation</i> (États-Unis)
FRCC	<i>Florida Reliability Coordinating Council</i> (États-Unis)	SK	Saskatchewan (Canada)
GB	Grande-Bretagne	SPP	<i>Southwest Power Pool</i> (États-Unis)
HU	Hongrie	TRE	<i>Texas Reliability Entity</i> (ou ERCOT) (États-Unis)
IT	Italie	TW	Taiwan
MA	Massachusetts (États-Unis)	UA	Ukraine
MB	Manitoba (Canada)	UY	Uruguay
ME	Maine (États-Unis)	VE	Vénézuela
MRO	<i>Midwest Reliability Organization</i> (États-Unis)	VT	Vermont (États-Unis)
MX	Mexique	WECC	<i>Western Electricity Coordinating Council</i> (États-Unis)

1 Mise en contexte

À la demande d'Hydro-Québec, le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) a réalisé une étude comparative des impacts environnementaux des filières de production d'électricité selon une approche cycle de vie. À cette fin, les données publiquement accessibles sur les différents modes de production d'électricité dans le monde ont été utilisées. Une comparaison des bouquets d'énergie électrique⁴ (*grid mix*) de certaines régions (pays, États, provinces) a également été réalisée.

Le présent rapport contient :

- la description des filières de production électrique existantes et des bouquets d'énergie électrique des régions comparées (chapitre 2);
- la description de la méthodologie employée et des données consultées (chapitre 3);
- un résumé de l'analyse du cycle de vie du kilowattheure d'Hydro-Québec adaptée pour rendre les résultats comparables aux données publiées (chapitre 4);
- des fiches comparant les filières de production et les bouquets d'énergie électrique selon différents indicateurs environnementaux (chapitre 5 et Annexe A).

⁴ Dans ce rapport, bouquet d'énergie électrique est compris comme l'ensemble de filières électriques, correspondant aux centrales en opération sur le territoire, de même qu'aux achats de producteurs privés et aux importations de territoires voisins.

2 Description des filières et des bouquets d'énergie électrique

Ce chapitre décrit les principales filières de production électrique existantes, de même que les bouquets d'énergie électrique retenus pour la comparaison avec celui du Québec.

2.1 Filières de production électrique

La présente étude s'intéresse aux filières de production d'électricité centralisée et généralement reliées à un réseau de distribution d'énergie. Les filières de production non raccordées à un réseau de distribution (que l'on qualifie souvent de production décentralisée ou autoproduction) ont été étudiées dans le cadre d'une autre étude réalisée par le CIRAIG pour le compte d'Hydro-Québec⁵, et n'ont donc pas été traitées dans cette étude.

2.1.1 Filières de production électriques issues de sources renouvelables

Une énergie est dite renouvelable si sa source est réapprovisionnée par les processus naturels à un taux égal ou supérieur à son taux d'utilisation. Elle inclut les ressources comme la biomasse, l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique), la chaleur géothermique, le mouvement de l'eau (hydraulique), et l'énergie éolienne (IPCC, 2011).

- **Filière hydroélectrique** : Une centrale hydroélectrique (parfois appelée hydraulique) est une usine dans laquelle l'énergie cinétique de l'eau est transformée en énergie mécanique, puis en énergie électrique. On classe généralement les centrales de ce type en deux catégories principales : les centrales à réservoir et les centrales au fil de l'eau.
 - Centrale au fil de l'eau : centrale alimentée directement par un cours d'eau et ne disposant pratiquement d'aucune réserve d'eau. Sa puissance varie donc suivant le débit du cours d'eau.
 - Centrale à réservoir : centrale alimentée par l'eau accumulée dans un lac artificiel créé au moyen d'un barrage et parfois d'autres ouvrages de retenue.

On retrouve également dans cette catégorie les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Ce type de centrale comporte un mode pompage permettant d'utiliser l'énergie produite par d'autres types de centrales pour stocker l'eau dans des réservoirs lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation.

⁵ CIRAIG. (2013). [ACV des filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle](#). 52 p. et ann. et CIRAIG. (2013). [ACV des filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle](#). 74 p. et ann.

Outre ces deux catégories, il existe plusieurs autres façons moins courantes de produire de l'électricité à partir de l'eau :

- Énergie marémotrice : repose sur le mouvement montant et descendant des énormes masses d'eau mobilisées par le phénomène des marées océaniques, dont l'énergie est récupérée grâce à un barrage sur un estuaire. Les oscillations de la marée font fonctionner des turbines qui produisent de l'électricité. Des usines marémotrices nécessitent des sites appropriés (baies ou estuaires) où l'amplitude des marées est importante (Planète énergies, 2013a).
- Énergie houlomotrice (des vagues) : il existe plusieurs types de dispositifs pour récupérer l'énergie des vagues, tels que les colonnes d'eau oscillantes côtières ou immergées, les débordements de chenal et les caissons flottants. Dans tous les cas, il s'agit de faire tourner une turbine pour produire de l'électricité (Planète énergies, 2013b).
- Énergie osmotique : utilise la concentration de sels de l'eau de mer pour produire de l'électricité. Une membrane semi-perméable, qui laisse passer l'eau, mais pas les sels minéraux, est mise en contact avec de l'eau douce d'un côté et de l'eau de mer de l'autre. Les molécules de sel attirent l'eau douce, qui migre alors vers le compartiment d'eau salée (phénomène appelé osmose). Grâce à ce mouvement d'eau, une turbine produit de l'électricité (Planète énergies, 2013c). Cette technologie est encore en développement.
- Énergie hydrolienne : le déplacement des eaux de certaines rivières ou des océans offre une force motrice considérable. Les expérimentations en cours concernent l'utilisation d'hydroliennes sous-marines ou de rivière, de grandes hélices ou turbines fixées en batteries sur les fonds marins ou flottant en position intermédiaire entre deux eaux. À ce jour, cette filière est encore au stade de démonstration (Planète énergies, 2013e).
- **Filière thermique - biomasse** : la bioénergie peut être produite à partir de plusieurs sources de biomasse, dont les résidus forestiers, les déchets agricoles et d'élevage, la rotation rapide de plantations forestières, la culture vouée à la production énergétique, la fraction organique des déchets municipaux et tout autre flux de matières organiques. Par une variété de procédés, ces matières premières peuvent servir directement à produire de l'électricité ou de la chaleur, ou alors être utilisées pour produire des combustibles gazeux, liquides ou solides (IPCC, 2011).

Le pouvoir calorifique de la matière organique peut servir à produire de l'électricité à partir de procédés thermiques (pyrolyse, gazéification, combustion directe) ou biochimiques (digestion anaérobie ou méthanisation) (EDF, 2013a).

- Combustion de la biomasse : la biomasse ligneuse (comme les résidus de bois, la bagasse, la paille, etc.) est généralement utilisée dans des procédés de combustion. En brûlant les résidus dans une chaudière, on produit ainsi de la vapeur et de l'électricité (procédés de cogénération).
- Combustion de biogaz : la biomasse fermentescible (comme les lisiers, les résidus liquides, les déchets) est d'abord convertie en biogaz par des microorganismes. Cette décomposition en absence d'oxygène permet de générer un gaz qui, par sa composition (principalement du méthane et du gaz carbonique), est voisin du gaz naturel fossile. Il peut ensuite être brûlé dans un groupe électrogène adapté (comme une centrale thermique) pour générer de l'électricité.

- **Filière éolienne** : l'électricité est générée à partir de turbines activées par le vent et couplées à un générateur électrique. Les parcs d'éoliennes peuvent être implantés en plaine ou en mer et produisent de l'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent. Cette production est intermittente, puisque le taux de production varie en fonction de la force du vent.
- **Filière solaire** : l'énergie solaire directe peut être utilisée de deux façons pour produire de l'électricité (le solaire thermique, qui utilise les radiations pour des fins de chauffage, n'est pas considéré ici) :
 - **Solaire photovoltaïque** : dans une centrale photovoltaïque, des panneaux solaires reliés entre eux captent la lumière du soleil. Le silicium, un matériau conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu. (EDF, 2013b). Ce mode de production est intermittent, puisque le taux de production varie en fonction du niveau d'ensoleillement.
 - **Solaire thermique à concentration** : permet de transformer l'énergie solaire en chaleur à température élevée, puis de convertir cette chaleur en vapeur, puis en énergie électrique. Pour concentrer l'énergie, des milliers de miroirs qui suivent le mouvement du soleil font converger ses rayons vers un récepteur situé au sommet d'une tour. Les centrales solaires thermiques ont une inertie thermique qui permet de limiter l'intermittence (EDF, 2012).
- **Filière géothermie** : extraction de la chaleur accumulée dans des formations rocheuses très profondes (jusqu'à une douzaine de kilomètres de profondeur) pour la transformer en énergie électrique et en énergie thermique utiles. La géothermie profonde s'apparente à la création artificielle d'un gisement géothermique dans un massif cristallin. À quelques kilomètres de profondeur, un caloporteur est injecté sous pression dans la roche. Il se réchauffe en circulant dans les failles rocheuses et la vapeur qui s'en dégage est pompée jusqu'à un échangeur de chaleur permettant la production d'électricité.

2.1.2 Filières de production issues de sources non renouvelables

L'énergie est de source non renouvelable lorsque la nature n'est pas en mesure de réapprovisionner les réserves à un rythme suffisant pour compenser sa consommation. C'est le cas des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, et des combustibles nucléaires. Dans tous les cas, l'électricité est produite à partir de centrales thermiques.

- **Filière thermique-Charbon** : l'électricité est produite par une centrale thermique brûlant du

Centrales thermiques

Unité de production d'énergie électrique qui utilise la chaleur dégagée par la combustion de biomasse, d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) ou d'énergie nucléaire. Cette chaleur peut être utilisée sous différentes formes (vapeur, gaz) ou directement transformée en énergie mécanique, comme dans les moteurs diesel.

- charbon. Aux fins de la présente étude, le lignite⁶ est considéré comme du charbon.
- **Filière thermique-Gaz naturel** : l'électricité est produite par une centrale thermique brûlant du gaz naturel. Certaines sont dites à « cycle combiné », où un cycle est constitué de turbine(s) à combustion (TAC) et d'une turbine à vapeur (rendement amélioré). Le gaz combustible est envoyé dans la TAC qui produit de l'électricité et des gaz d'échappement très chauds (fumées). La chaleur des fumées est récupérée par une chaudière qui produit ainsi de la vapeur. Une partie de cette vapeur est utilisée par une turbine pour produire une quantité supplémentaire d'électricité.
 - **Filière thermique-Gaz des hauts fourneaux** : Les gaz récupérés des hauts fourneaux lors de la production d'acier peuvent aussi être utilisés pour la production d'électricité, bien que leur pouvoir calorifique soit plus faible que celui du gaz naturel.
 - **Filière thermique-Pétrole** : l'électricité est produite par une centrale thermique à partir de la combustion d'un hydrocarbure dans un ou plusieurs moteurs diesel qui actionnent un alternateur, ou dans une chaudière classique où la vapeur produite sert à actionner une turbine.
 - **Filière thermique-Nucléaire** : l'électricité est produite par une centrale thermique qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire. Certaines technologies utilisent de l'uranium enrichi, alors que d'autres utilisent de l'uranium naturel.

Pour comparer les impacts environnementaux potentiels associés aux différents modes de production d'électricité, une revue de littérature des ACV des filières centralisées a été effectuée et est présentée à la section 3.2. Notons que pour certaines des filières présentées plus haut, il n'existe pas d'ACV publiées. C'est le cas, entre autres, des filières osmotique et hydrolienne. Celles-ci ne sont donc pas incluses dans les fiches comparatives de l'Annexe A.

2.2 Bouquets d'énergie électrique

L'électricité distribuée au consommateur est généralement produite non pas par une, mais par un ensemble de filières électriques, correspondant aux centrales en opération sur le territoire, de même qu'aux importations de territoires voisins. On appelle ce mélange le « bouquet d'énergie électrique ».

Aux fins de la présente étude, le bouquet d'énergie électrique québécois a été comparé à celui des régions voisines ou des principaux partenaires commerciaux du Québec, pour lesquelles des données environnementales étaient disponibles. Des pays avec lesquels l'électricité du Québec est souvent comparée ont également été ajoutés à la liste.

Les compositions des bouquets d'énergie électrique retenus pour l'exercice sont issues de la base de données *ecoinvent* v3.0⁷ (*ecoinvent* Centre, Internet). Elles sont résumées au Tableau 2-1 pour les provinces canadiennes, au Tableau 2-2 pour les régions électriques de l'Amérique du Nord correspondant aux huit conseils régionaux de la NERC (North American Electric Reliability Corporation), au

⁶ Charbon fossile, d'aspect ligneux ou terreux, noir ou brun, contenant 65 à 75 % de carbone, intermédiaire entre la tourbe et la houille (Larousse, <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/lignite/47117?q=lignite#47045>).

⁷ La base de données *ecoinvent* v3.0 présente généralement la composition des bouquets d'énergie électrique de 2008.

Tableau 2-3 pour les États du Nord-Est américain (modélisés à partir des données de l' U.S. Energy Information Administration) et au Tableau 2-4 pour divers autres pays du monde. Ces tableaux présentent la répartition des filières de production électrique en 2008 ou 2012 (pour les États américains et le Québec) pour la portion d'électricité produite dans la région donnée. Les importations sont indiquées séparément et peuvent aussi impliquer plusieurs filières ou bouquets d'énergie électrique. Dans le cas des États du Nord-Est américain (Tableau 2-3), les importations d'autres régions n'étaient pas disponibles. Par conséquent, seules les données de production d'électricité de chacun des États sont analysées. Enfin, les tableaux indiquent également un pourcentage parfois approximatif de pertes attribuables au transport et à la distribution de l'électricité dans le réseau de chacune des régions. Cette information provient des processus de la base de données ecoinvent v3.0, pour une distribution chez le consommateur (incluant donc les réseaux de haute, moyenne et basse tensions).

Les conseils régionaux de la NERC sont au nombre de huit et couvrent le Canada, les États-Unis et le Mexique, tel qu'illustré à la Figure 2-1. Les bouquets d'énergie électrique employés dans la présente étude, et provenant de *ecoinvent* v3.0, (et décrits au Tableau 2-2) ne considèrent cependant que la portion américaine et n'incluent pas les données des provinces canadiennes et de la portion mexicaine.

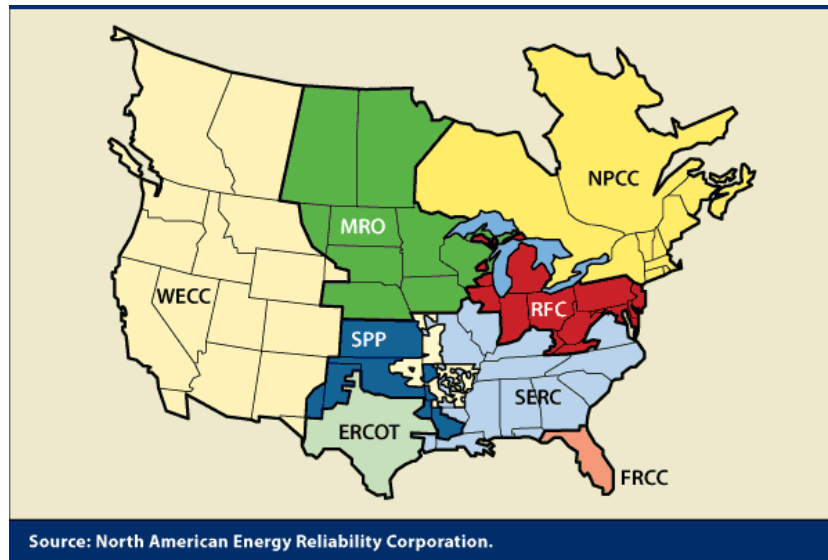


Figure 2-1 : Régions électriques de l'Amérique du Nord : les huit conseils régionaux de la NERC (Combs, 2008).

Pour la définition des codes pays et régions employés, se référer à la liste fournie à la page xii.

Tableau 2-1 : Composition des bouquets d'énergie électrique des provinces canadiennes étudiées (2008 - 2012)

Filière électrique	Nouveau-Brunswick	Québec (avec Gentilly-2)	Ontario	Manitoba	Terre-Neuve et Labrador	Colombie-Britannique
Charbon	36,7 %	0,3 %	23,7 %	0,2 %	s/o	s/o
Pétrole	15,9 %	0,03 %	0,2 %	0,1 %	8,4 %	0,1 %
Gaz naturel	6,2 %	0,21 %	6,7 %	0,2 %	s/o	2,6 %
Nucléaire	13,8 %	2,62 %	39,6 %	s/o	s/o	s/o
Hydroélectrique	11,9 %	95,33 %	21,1 %	96,6 %	91,5 %	80,7 %
Éolien	s/o	0,88 %	0,2 %	0,7 %	s/o	s/o
Biomasse	s/o	0,53 %	1,1 %	s/o	s/o	3,0 %
Biogaz/déchets	s/o	0,09 %	< 0,1 %	s/o	s/o	s/o
Gaz haut fourneau	s/o	s/o	< 0,1 %	s/o	s/o	s/o
Importations et achats (régions et %)	NS (< 1 %) NPCC (3,6 %) QC (11,3 %)	Inclus dans la répartition ci-haut	MB (0,2 %) NPCC (3,9 %) QC (3,1 %)	ON (0,3 %) SK (1,8 %) MRO (0,2 %)	QC (0,1 %)	AB (0,4 %) WECC (13,2 %)
<i>Pertes de transport/distribution (basse tension)*</i>	6,7 %*	7,5 %	6,7 %*	6,7 %*	6,7 %*	6,7 %*

Sources : Québec : Hydro-Québec (Tirado et coll., 2014); Autres provinces canadiennes : *ecoinvent* v3.0 (données pour 2008). Le total peut ne pas évaluer 100 % à cause de l'arrondissement. Les modes de génération électriques pour lesquels la fraction indiquée est s/o ne sont pas inclus dans la modélisation.

*Les pertes de transport et distribution des provinces canadiennes autres que le Québec sont estimées dans *ecoinvent* 3.0 à partir de données moyennes européennes. La moyenne canadienne est plus élevée (8,4 %), mais elle n'est pas encore intégrée dans la base de données.

Tableau 2-2 : Composition des bouquets d'énergie électrique des régions électriques de l'Amérique du Nord (portion États-Unis seulement) (2008)

Filière électrique	NPCC	RFC	SERC	FRCC	MRO	SPP	ERCOT / TRE	WECC
Charbon	9,3 %	60,5 %	50,2 %	24,0 %	69,0 %	61,0 %	32,8 %	28,4 %
Pétrole	1,6 %	0,5 %	0,7 %	4,5 %	0,4 %	0,2 %	1,0 %	0,5 %
Gaz naturel	33,2 %	8,0 %	16,9 %	55,6 %	2,7 %	25,6 %	47,5 %	31,7 %
Nucléaire	27,1 %	28,5 %	26,6 %	14,2 %	10,6 %	4,3 %	12,2 %	9,4 %
Hydroélectrique	12,1 %	0,8 %	3,8 %	< 0,1 %	4,1 %	3,8 %	0,2 %	22,5 %
Éolien	0,8 %	0,7 %	0,1 %	s/o	7,0 %	4,3 %	5,8 %	3,0 %
Biomasse	3,2 %	0,9 %	1,8 %	1,8 %	1,5 %	0,8 %	0,1 %	1,3 %
Biogaz/déchets	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o
Gaz haut fourneau	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o
Importations et achats	NB (0,5 %) NS (< 0,1 %) ON (6,3 %) QC (5,9 %)	s/o	s/o	s/o	MX (4,5 %) SK (0,1 %)	s/o	MX (0,4 %)	BC (1,1 %)
Pertes de transport/distribution (basse tension)*	5,9 %	5,9 %	5,9 %	5,9 %	5,9 %	5,9 %	5,9 %	5,9 %

Source : *ecoinvent* v3.0. Le total peut ne pas évaluer 100 % à cause de l'arrondissement. Les modes de génération électriques pour lesquels la fraction indiquée est s/o ne sont pas inclus dans la modélisation.

* Les pertes sont approximées à partir de la moyenne nationale (*ecoinvent* 3.0).

Tableau 2-3 : Composition des bouquets de production électrique de certains États du Nord-Est américain et du Québec (Hydro-Québec et Québec) en 2012

Filière électrique	CT	MA	ME	NH	NY	RI	VT	Hydro-Québec Production
Charbon	1,81 %	5,90 %	0,31 %	6,58 %	3,35 %	s/o	s/o	s/o
Pétrole	0,31 %	0,48 %	0,58 %	0,11 %	0,43 %	0,22%	0,05 %	0,2 %
Gaz naturel	45,79 %	68,16 %	41,89 %	36,59 %	43,80 %	98,51%	0,04 %	s/o
Nucléaire	47,28 %	16,19 %	< 0,1 %	42,51 %	30,03 %	s/o	75,95 %	2,3 %
Hydroélectrique	0,86 %	2,52 %	25,87 %	6,69 %	18,16 %	0,05%	16,88 %	97,6 %
Éolien	s/o	0,25 %	6,15 %	1,08 %	2,20 %	0,02%	1,63 %	s/o
Biomasse	1,85 %	4,76 %	22,26 %	6,09 %	1,58 %	1,21%	5,38 %	s/o
Biogaz/déchets	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o
Gaz haut fourneau	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o
Autre	2,09 %	2,59 %	2,94 %	0,34 %	0,75 %	s/o	0,08 %	s/o
Importations et achats	Pas inclus	Pas inclus	Pas inclus	Pas inclus	Pas inclus	Pas inclus	Pas inclus	Pas inclus
Pertes de transport*	3,2 %	3,2 %	3,2 %	3,2 %	3,2 %	3,2 %	3,2 %	5,4 %

Source : US EIA (<http://www.eia.gov/electricity/data/state/>). Les modes de génération électriques pour lesquels la fraction indiquée est s/o ne sont pas inclus dans la modélisation. Les importations et les achats ne sont pas inclus dans ces bouquets, seule la production provenant de l'État est considérée. Hydro-Québec: (Hydro-Québec, 2012)⁸.

* Les pertes sont évaluées par approximation à partir de la moyenne nationale (*ecoinvent 3.0*).

⁸ Ces données n'incluent pas toujours les mêmes filières que les données de Tirado et coll (2014). Ceci est dû aux différences dans la définition du système; dans le cas de l'étude du kWh, les centrales thermiques appartenant à Hydro-Québec étaient exclues étant donné leur faible contribution à la production totale d'Hydro-Québec

Tableau 2-4 : Composition des bouquets d'énergie électrique moyens de divers pays (2008)

Filière électrique	Allemagne	Brésil	Chine	Danemark	Espagne	États-Unis	Finlande	France	Inde	Mexique	Russie	Norvège	Portugal	Suède
Charbon	41,60 %	1,60 %	76,80 %	34,70 %	15,20 %	44,41 %	14,30 %	4,20 %	67,20 %	8,10 %	16,50 %	< 0,1 %	19,3 %	0,40 %
Pétrole	1,40 %	3,30 %	0,70 %	2,20 %	5,60 %	0,86 %	0,40 %	1,00 %	4,00 %	18,80 %	1,60 %	< 0,1 %	7,1 %	0,50 %
Gaz naturel	12,30 %	5,50 %	0,90 %	13,80 %	37,80 %	22,90 %	11,70 %	3,80 %	9,60 %	50,00 %	47,60 %	0,29 %	26,2 %	0,40 %
Nucléaire	22,70 %	2,60 %	2,10 %	s/o	18,60 %	19,82 %	23,80 %	75,40 %	1,70 %	3,80 %	16,00 %	s/o	s/o	38,10 %
Hydroélectrique	4,30 %	72,00 %	18,60 %	0,10 %	8,70 %	6,63 %	18,70 %	10,80 %	14,30 %	15,90 %	17,30 %	96,59 %	13,3 %	43,50 %
Éolien	6,50 %	0,10 %	0,40 %	14,40 %	10,70 %	1,89 %	0,30 %	1,10 %	1,70 %	0,10 %	< 0,1 %	0,63 %	10,5 %	1,30 %
Biomasse	1,30 %	5,70 %	0,10 %	3,60 %	0,60 %	1,34 %	10,50 %	0,30 %	0,20 %	0,30 %	< 0,1 %	0,21 %	2,6 %	5,40 %
Biogaz/déchets	3,00 %	s/o	s/o	4,20 %	0,70 %	s/o	0,60 %	0,80 %	s/o	< 0,1 %	0,20 %	< 0,1 %	1,1 %	1,40 %
Gaz haut fourneau	1,10 %	0,80 %	0,40 %	s/o	0,30 %	0,37 %	0,60 %	0,50 %	s/o	2,90 %	0,40 %	< 0,1 %	0,3 %	0,60 %
Tourbe	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	0,40 %
Autres	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o	s/o
Importations et achats	AT (1,1 %) DK (1,5 %) CZ (1,3 %) FR (1,7 %) NL (0,1 %) PL (<0,1 %)	PY (5,2 %) AR (2,4 %) VE (0,5 %) UY (0,3 %)	TW (0,1 %)	SE (14,0 %) NO (10 %) DE (2,9 %)	FR (1,5 %) PT (0,4 %)	CA (1,29 %) MX (<0,1 %)	RU (12,0 %) SE (3,1 %) EE (2,5 %) HU (1,3 %) NO (0,2 %)	CH (0,7 %) BE (0,4 %) ES (0,3 %) DE (0,2 %) GB (0,2 %) IT (0,2 %)	BT (1,2 %)	TRE (0,1 %)	UA (0,3 %)	SE (1,68 %) DK (0,3 %) NL (0,23 %) RU (0,12 %) FI (<0,1 %)	ES (19,7 %)	NO (4,8 %) FI (2,0 %) DK (0,9 %) DE (0,3 %) PL (0,1 %)
Pertes de transport/distribution (basse tension)	4,9 %	14,0 %	5,6 %	6,1 %	5,0 %	5,9 %	3,7 %	6,1 %	13,1 %	15,4 %	2,7 %	7,6 %	7,4 %	7,2 %

Source : ecoinvent v3.0. Le total peut ne pas éгалer 100 % à cause de l'arrondissement. Les modes de génération électrique pour lesquels la fraction indiquée est s/o ont été négligés dans la modélisation.

3 Approche méthodologique

Ce chapitre résume ce qu'est l'analyse du cycle de vie et les indicateurs environnementaux qui en découlent et présente la recherche bibliographique ayant mené à la compilation des données environnementales pour la comparaison des filières et des bouquets d'énergie électrique.

3.1 Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV), ou écobilan, évalue les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service (ci-après appelé un système de produit) sur l'ensemble de son cycle de vie, c'est-à-dire toutes les étapes depuis l'extraction de ressources naturelles, en passant par la fabrication, l'emballage, la distribution, la consommation ou l'usage du produit ou service jusqu'à son élimination finale (incluant les étapes de réutilisation et recyclage, le cas échéant), comme l'illustre la Figure 3-1. Ce faisant, elle constitue une des méthodes les plus complètes et performantes pour procéder à une évaluation environnementale d'un produit ou d'un service (comme « fournir de l'électricité » par exemple).

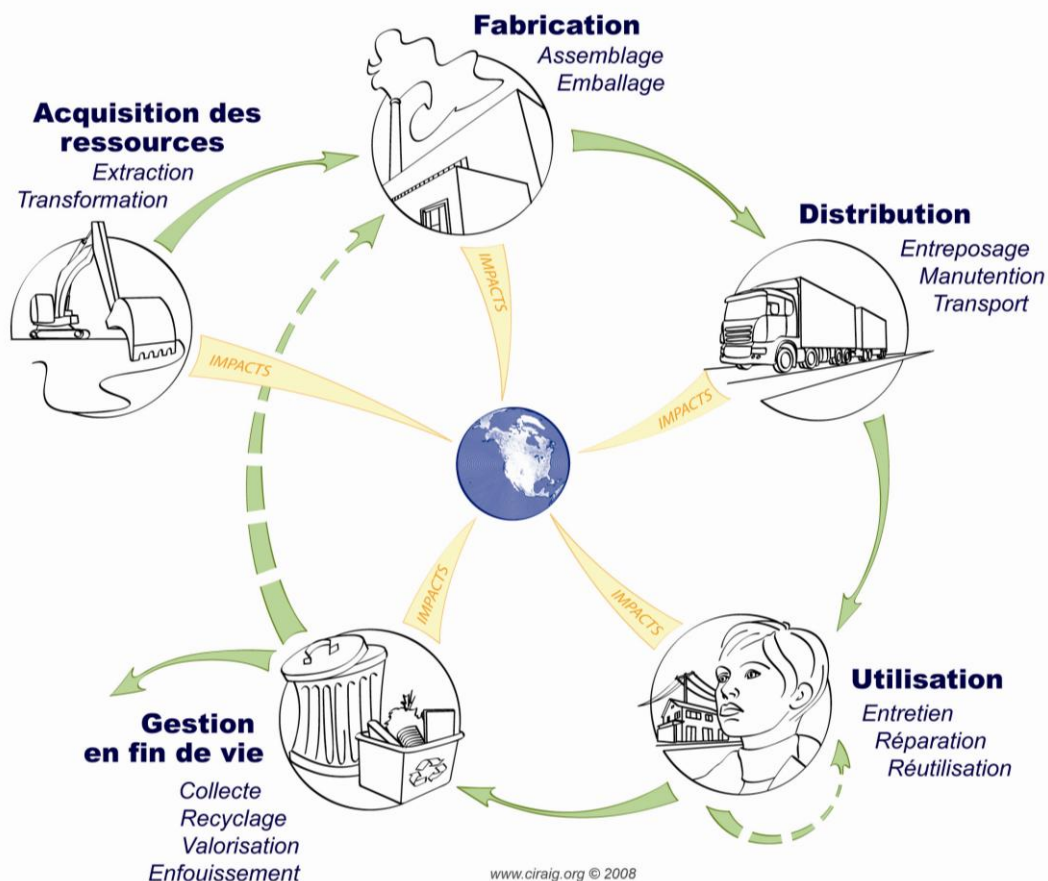


Figure 3-1 : Illustration des différentes étapes prises en compte en ACV.

Chaque étape du cycle de vie d'un produit consomme des entrants, comme de l'énergie et des ressources renouvelables (p. ex. : de l'hydroélectricité, du bois, de l'eau) et non renouvelables

(p. ex. : du pétrole, du gaz naturel, des métaux) et génère un certain nombre de sortants comme des émissions dans l'environnement (p. ex : gaz à effet de serre, déchets, effluents). Ces consommations et ces émissions sont à la source d'impacts au niveau global (changement climatique, destruction de la couche d'ozone), régional (acidification et eutrophisation des cours d'eau⁹, smog) et local (impacts toxicologiques et écotoxicologiques¹⁰). L'ACV combine l'utilisation de données recueillies dans le cadre d'une étude spécifique (données primaires) et de données génériques issues de bases de données (données secondaires). Les résultats, pris dans leur ensemble, constituent donc un ensemble d'impacts potentiels estimés.

Pour les entreprises, les concepteurs et les gouvernements, l'ACV constitue avant tout un important outil d'aide à la décision dans une démarche de responsabilité sociale. Régie par les normes de la série ISO 14040¹¹, l'ACV est une méthode rigoureuse qui comporte quatre phases distinctes impliquant l'identification et la quantification des entrants et des sortants reliés au produit ou à l'activité, ainsi que l'évaluation des impacts potentiels associés à ces flux de matières et d'énergie.

3.1.1 Méthodes d'évaluation des impacts

L'évaluation des impacts consiste à prendre les entrants et sortants de matières et d'énergie qui ont lieu tout au long du cycle de vie étudié, et à les traduire en impacts environnementaux potentiels, à l'aide de modèles comme indiqué à la Figure 3-2.

⁹ L'acidification résulte de l'absorption dans l'eau du CO₂ et d'autres composés soufrés ou nitrés auparavant émis à l'atmosphère. Cette absorption en modifie le pH, dégradant ainsi l'ensemble des services écosystémiques. L'eutrophisation réfère quant à elle à la pollution d'un milieu aquatique par un apport excessif en substances nutritives favorisant la surproduction d'algues et causant ultimement des dommages à l'écosystème aquatique par une réduction de l'apport en lumière naturelle et une surconsommation de l'oxygène présent.

¹⁰ Impact des substances ayant un effet toxique sur les écosystèmes.

¹¹ La norme ISO 14040:2006 spécifie les principes et le cadre applicables à la réalisation d'analyses du cycle de vie et des études d'inventaire du cycle de vie. Pour en savoir plus : www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail?csnumber=37456

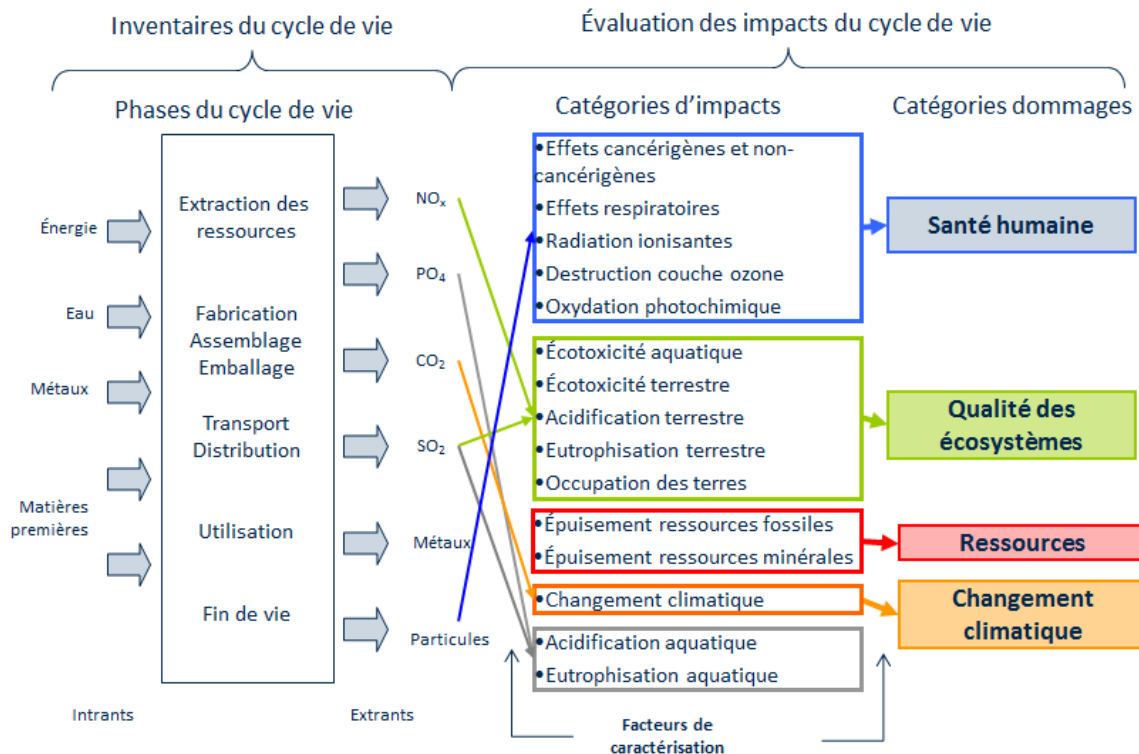


Figure 3-2 : Schéma des étapes de l'analyse du cycle de vie.

Les indicateurs environnementaux sont de deux types, suivant une approche « problème » ou « dommage » selon le niveau de modélisation de la chaîne de cause à effet des problématiques environnementales. Plusieurs méthodes d'ÉICV (Évaluation des Impacts du Cycle de Vie) proposent les deux approches (Tableau 3-1).

Les méthodes orientées « problèmes » (aussi connues sous le nom de *midpoint*) s'arrêtent aux effets primaires, découlant directement des activités étudiées, comme par exemple l'émission de chlorofluorocarbures (CFC) et ses conséquences sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.

Contrairement aux méthodes orientées « problèmes », les méthodes orientées « dommages » (aussi appelées *endpoint*) cherchent à regrouper les impacts en fonction des conséquences, aussi loin que possible dans la chaîne de cause à effet, des impacts environnementaux. Ces méthodes tentent donc de prendre en compte les effets secondaires; ainsi, au lieu de parler d'émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone (comme les CFC), les catégories d'impact quantifient le dommage potentiel sur la santé humaine (cancers, cataractes, etc.). Ces méthodes montrent donc plus clairement l'impact potentiel, mais se butent à la difficulté de suivre la chaîne de cause à effet, notamment lorsque la chaîne de causalité n'est pas clairement établie.

Tableau 3-1 : Méthodes d'évaluation des impacts

Nom de la méthode	Approche problème ou dommage	Contexte géographique	Nombre de catégories d'impacts (problème)	Référence
EcoIndicator 99	Dommage	Europe	12	Goedkoop et coll., 2001
CML	Problème	Europe	10	Guinée et coll., 2002
EDIP 2003	Problème	Europe	8	Hauschild et coll, 2003
TRACI	Problème	États-Unis	9	Bare et coll., 2002
LIME	Les deux	Japon	11	Hayashi et coll. 2004
LEO-SCS-002	Problème	États-Unis	25	Leonardo Academy, 2012
IMPACT 2002+	Les deux	Europe	12	Jolliet et coll. 2003
ReCiPe	Les deux	Europe	15	Goedkoop et coll., 2009
IMPACT World+	Les deux	Monde, continents	18	www.impactworldplus.org

3.1.2 Indicateurs environnementaux

Les catégories d'impacts (problème et dommage) – ici nommés indicateurs environnementaux pour simplifier – varient d'une méthode ÉICV à l'autre, mais peuvent néanmoins inclure une quinzaine d'indicateurs. Le Tableau 3-2 présente, à titre d'exemple, un aperçu des indicateurs environnementaux retrouvés dans les méthodes CML et IMPACT 2002+, qui sont les méthodes les plus couramment citées dans la littérature.

La méthode IMPACT World+, mentionnée au Tableau 3-1, est la plus récente d'entre elles (officiellement disponible depuis mai 2013). Elle n'est pas encore entièrement documentée et les logiciels d'ACV ne l'ont pas encore tous intégrée à leur plateforme, mais elle permet de profiter des dernières avancées en termes de modélisation environnementale. Elle propose également de nombreuses innovations scientifiques et inclut de nouvelles catégories d'impacts d'intérêt, telle que l'utilisation de l'eau.

Tableau 3-2 : Indicateurs environnementaux utilisés par les méthodes CML et IMPACT 2002+

Indicateur – Approche dommage (méthode IMPACT 2002+)	Indicateur- Approche problème	Unités		Commentaires
		IMPACT 2002+	CML	
Changement climatique (kg éq. CO ₂)	Potentiel de réchauffement global (PRG)	kg éq. CO ₂		Impact global. Les modèles et facteurs du GIEC sont utilisés par toutes les méthodes. IMPACT 2002+ considère un horizon de temps de 500 ans. Les autres méthodes considèrent un horizon de 100 ans.
Santé humaine (DALY)	Toxicité humaine	s/o	kg éq. 1,4-DB	Impact local à global. Concerne les effets des substances toxiques sur l'environnement humain.
	Effets respiratoires, organiques/inorganiques	kg éq. C ₂ H ₄ / kg PM _{2,5}	s/o	Impact local. « inorganiques » (smog d'hiver) : dus aux fines particules (< 2,5 µm). « organiques » : associés aux composés organiques volatils (COV)
	Effets cancérigènes/ Effets non cancérigènes	kg éq. C ₂ H ₃ Cl	s/o	Impact local associé aux impacts à la santé humaine causés par des substances cancérigènes ou non-cancérigènes.
	Radiations ionisantes	Bq éq. ¹⁴ C	s/o	Impact local généré par des substances émettant des radiations.
Qualité des écosystèmes (PDF.m ² .an)	Acidification	kg éq. SO ₂		Impact régional. Selon les méthodes, il s'applique uniquement au compartiment aquatique ou comprend aussi le compartiment terrestre.
	Eutrophisation	kg éq. PO ₄ ³⁻		Impact régional qui prend en compte un déséquilibre des nutriments dans les systèmes aquatiques.
	Destruction de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11		Impact global associé à la réduction de la couche d'ozone stratosphérique et à l'augmentation des rayons UV qui atteignent la Terre.
	Oxydation photochimique (Smog)	kg éq. C ₂ H ₄		Impact régional. Smog d'été lié à la formation d'ozone troposphérique. Les substances associées à ce phénomène sont principalement les COV.
	Écotoxicité terrestre/aquatique (marine et eau douce)	kg TEG sol/eau	kg éq. 1,4-DB	Impact local. Prise en compte de l'effet des substances toxiques sur la biodiversité des écosystèmes. Les méthodes emploient différents modèles et unités de mesure pour l'indicateur.
	Utilisation des terres	m ² éq. arable	s/o	Impact régional visant la prise en compte de la perte de biodiversité associée à l'usage des surfaces terrestres.
Ressources (MJ)	Énergie non renouvelable	MJ		Impact global. Mesure de la quantité d'énergie extraite sous forme de combustibles fossiles ou d'uranium.
	Extraction minérale/Épuisement des ressources abiotiques	MJ supplémentaire	kg éq. Sb	Impact global. Les deux méthodes emploient différents modèles et unités de mesure pour cet indicateur. L'extraction minérale (IMPACT 2002+) réfère à l'énergie supplémentaire nécessaire pour extraire des minerais de mines à faible concentration. CML évalue le taux d'extraction et la rareté de chaque minéral.

La section 5.1 détaille les indicateurs environnementaux retenus dans la présente étude pour comparer les filières électriques et les bouquets d'énergie électrique. Notons que certains indicateurs utilisés dans les méthodes d'impact ne font l'objet d'aucune fiche comparative au niveau des filières de production d'électricité en raison du trop faible nombre ou de l'absence de résultats portant sur ces filières dans les articles publiés.

3.2 Recherche bibliographique

L'objectif de la revue bibliographique était d'extraire des résultats d'impact ACV associés à toutes les formes de production d'électricité et publiés depuis 2007.

Au final, 67 références ont servi à compiler plus de 1 000 résultats couvrant une dizaine de filières et plus de vingt indicateurs environnementaux de natures diverses.

Un tableau résumant les références utilisées est présenté à la section 5.2 et l'approche qui a été employée pour réaliser la recherche est décrite à l'Annexe C.

4 L'analyse de cycle de vie du kWh d'Hydro-Québec

Hydro-Québec utilise l'ACV depuis quelques années pour évaluer divers produits et services. En 2014, le CIRAIG a réalisé pour le compte d'Hydro-Québec, l'ACV de la production, de l'achat, du transport et de la distribution de l'électricité au Québec. La méthode européenne IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.* 2003) avait alors été retenue pour effectuer l'évaluation des impacts du cycle de vie du kWh québécois. Afin de pouvoir comparer les bouquets d'énergie électrique en utilisant la plus récente méthode d'évaluation des impacts disponible, de nouveaux résultats ont été produits avec la méthode d'impact IMPACT World+. De plus, afin de pouvoir comparer les impacts associés aux filières hydroélectriques d'Hydro-Québec avec ceux des autres filières de production d'électricité retrouvées dans la littérature, de nouveaux résultats ont été produits en utilisant la méthode d'impact CML.

Ce chapitre présente les résultats de cette analyse, adaptés selon les méthodes IMPACT World+ et CML. Ce sont ces résultats qui ont servi à établir le profil des filières hydroélectriques (centrales à réservoir et au fil de l'eau) d'Hydro-Québec, ainsi que le bouquet d'énergie électrique du Québec inclus dans les fiches comparatives présentées à l'Annexe A.

4.1 Phase 1 : Définition du système étudié

Le système étudié visait « *La production et l'achat, le transport et la distribution de 1 kWh d'électricité au Québec, par le réseau principal d'Hydro-Québec, en 2012* ».

La production, l'achat, le transport et la distribution d'électricité par Hydro-Québec impliquent différents types d'infrastructures et d'activités, réparties à travers la province et dans des territoires limitrophes.

La production

La grande majorité de l'électricité produite au Québec par le réseau principal d'Hydro-Québec (près de 97 % de la production totale en 2012) provient de ses centrales hydroélectriques. Celles-ci se déclinent en deux grandes catégories, soit les centrales au fil de l'eau (38) et les centrales à réservoir (20), représentant respectivement 37 % et 63 % de la puissance hydroélectrique installée. Jusqu'au 28 décembre 2012, la société opérait également une centrale nucléaire (Gentilly-2). Ayant généré 2,3 % de l'électricité du parc de production en 2012, celle-ci a donc été incluse à l'étude. D'autres centrales d'Hydro-Québec ont toutefois été exclues du système parce qu'elles avaient cessé leurs opérations (par exemple la centrale éolienne de Cap-Chat fermée en 2008 et la centrale thermique classique au mazout de Tracy fermée en 2011), ou que leur production était non significative (centrales thermiques à turbines à gaz de Bécancour, La Citière et Cadillac, avec une contribution de 0,2 % de la production totale d'Hydro-Québec) et donc leur contribution aux impacts également jugée *a priori* non significative.

Les achats

En plus de sa propre production, Hydro-Québec achète de l'énergie électrique. Celle-ci provient de producteurs privés dans la province (principalement issue de centrales hydroélectriques, à biomasse et de parcs éoliens), mais aussi des importations des provinces limitrophes et des États du Nord-Est des États-Unis. L'achat d'électricité représente près de 20 % du total de

l'énergie produite et achetée par Hydro-Québec; la centrale hydroélectrique de Churchill-Falls (Terre-Neuve et Labrador) en étant la principale source (71 % du total de l'énergie achetée par Hydro-Québec), suivie par les centrales hydroélectriques au Québec qui n'appartiennent pas à Hydro-Québec (14 %), par des centrales thermiques (7 % du total acheté, incluant des centrales nucléaires, au gaz naturel, au charbon et au mazout), l'énergie éolienne (4 % du total acheté) et enfin les centrales à biomasse (3 % du total acheté).

Le transport

Le transport de l'électricité produite par les centrales est assuré par le réseau de transport de la division Hydro-Québec TransÉnergie, lui-même constitué de deux sous-systèmes : les lignes de transport et les postes de transformation. Les lignes de transport sont principalement composées des supports (les pylônes), de l'appareillage électrique et des conducteurs. Les postes ont pour leur part trois rôles principaux, quelle que soit leur tension : ils maintiennent, sectionnent et transforment l'énergie qui transite sur le réseau de lignes sillonnant la province. En 2012, le réseau de transport comptait 33 911 km de lignes et 516 postes de transformation.

La distribution

Le réseau de la division Hydro-Québec Distribution couvre l'ensemble des installations destinées à la distribution de l'électricité à partir de la sortie des postes de transformation du réseau de transport jusqu'aux points de raccordement aux installations des consommateurs. Le réseau de distribution comprend les structures aériennes, soit plus de 2 700 000 poteaux répartis sur 114 649 km de lignes et les structures souterraines (3 900 km de conduites).

4.2 Phase 2 : Inventaire du cycle de vie (collecte de données)

Pour rassembler toutes les informations nécessaires à l'analyse, la collecte des données s'est déroulée par échantillonnage, en étroite collaboration avec Hydro-Québec. Étant donné l'envergure du système étudié, un échantillon de collecte, regroupant une fraction représentative des différentes activités de chacune des divisions, a tout d'abord été défini. Des données primaires (directement fournies par Hydro-Québec ou ses fournisseurs) ont été collectées pour cet échantillon et mises à l'échelle pour le reste du parc. La collecte des données a été finalisée à l'aide de données secondaires et d'hypothèses (issues de la littérature, avis d'experts, etc.).

Les données primaires collectées auprès d'Hydro-Québec et de ses fournisseurs concernent la construction et l'opération des centrales (produits utilisés pour leur fonctionnement, combustibles, émissions, etc.), postes de transformation et lignes de transport et de distribution de même que les quantités d'électricité produites, achetées et perdues lors du transport et de la distribution. Pour chacune des divisions, ces informations ont été rassemblées grâce à des questionnaires électroniques transmis aux experts ainsi qu'au moyen de rencontres avec les conseillers environnement, puis complétées par des visites sur le terrain.

Les données secondaires, utilisées pour compléter les informations recueillies auprès des divisions d'Hydro-Québec, comprennent la base de données d'inventaire *ecoinvent*, la base de données interne du CIRAIQ, les bases de données publiques disponibles, une revue de la littérature et l'apport de certains experts.

4.3 Phase 3 : Évaluation des impacts du cycle de vie (résultats)

4.3.1 Bouquet d'énergie électrique du Québec

Les impacts du cycle de vie présentés dans cette section ont été évalués à l'aide de la plus récente méthode d'évaluation, IMPACT World+ v1.0. Cette méthode évalue l'impact du cycle de vie selon différents enjeux environnementaux (changement climatique, épuisement des ressources, acidification aquatique, transformation et utilisation de terres, etc.) puis les regroupe en deux indicateurs orientés « dommage » (*Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*). Ceci simplifie la compréhension des résultats et permet une évaluation plus rapide des principaux contributeurs aux enjeux environnementaux associés au cycle de vie étudié. Deux indicateurs orientés « problème » sont également présentés de manière séparée : *Consommation de ressources* (divisée en *Ressources minérales* et *Énergies fossiles*) et *Changement climatique*, puisqu'il s'agit de deux enjeux importants dans la production d'électricité. Les figures qui suivent résument les résultats selon les indicateurs retenus.¹²

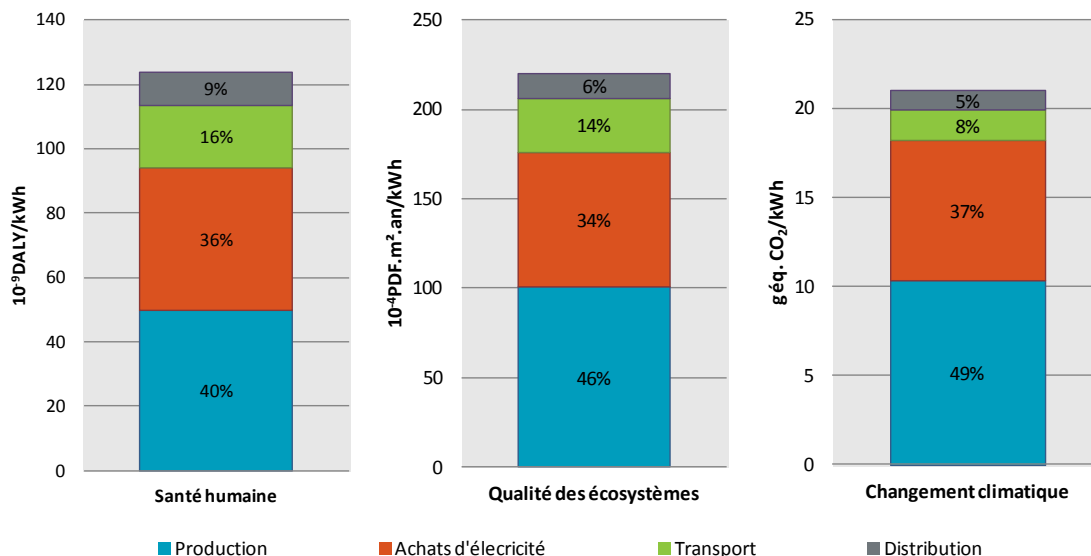


Figure 4-1 : Résultats des indicateurs *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes* et *Changement climatique* associés à la production et l'achat, le transport et la distribution de 1 kWh d'électricité au Québec, par le réseau principal d'Hydro-Québec, en 2012 (méthode IMPACT World+).

Dans la méthode IMPACT World+, les effets du changement climatique sur la santé humaine et les écosystèmes sont inclus dans les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* respectivement. Comme les effets du réchauffement climatique prédominent, le profil environnemental obtenu pour les trois indicateurs de la Figure 4-1 sont très semblables, c.-à-d. que les contributions des divisions d'Hydro-Québec et des achats d'électricité y sont sensiblement les mêmes.

¹² Il est à noter que dans la méthode d'évaluation employée, les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* comprennent une part d'impacts potentiels liés à l'utilisation d'eau. Or, la base de données *ecoinvent* v2.2 utilisée pour la modélisation du cycle de vie n'est pas pleinement adaptée à l'évaluation des flux d'eau, ce qui introduit une incertitude non quantifiée aux résultats présentés.

Pour ces trois indicateurs, les impacts du kilowattheure distribué sont dominés par la production d'électricité provenant du parc d'Hydro-Québec ainsi que par ses achats d'électricité. Du côté de la production, l'impact potentiel provient essentiellement des émissions de CO₂ issues des centrales hydroélectriques avec réservoir et, dans une moindre mesure, de la production des matériaux utilisés dans la construction des barrages et infrastructures qui y sont associés. En ce qui a trait aux achats d'électricité, bien qu'ils ne représentent que 20 % de l'électricité injectée dans le réseau, ils contribuent à 37 % des émissions totales de GES. C'est que le profil de l'électricité achetée est fortement affecté par des filières de production thermique à combustibles fossiles, donc à forte intensité d'émissions de GES, et ce, malgré le fait que seulement 7 % de l'énergie achetée en soit issue. Les émissions associées aux réseaux de transport et de distribution proviennent principalement des pertes d'électricité lors du transport et de la distribution, de la construction des infrastructures (postes de transformation et transformateurs) et de la consommation de carburants lors de l'opération des infrastructures (véhicules de service).

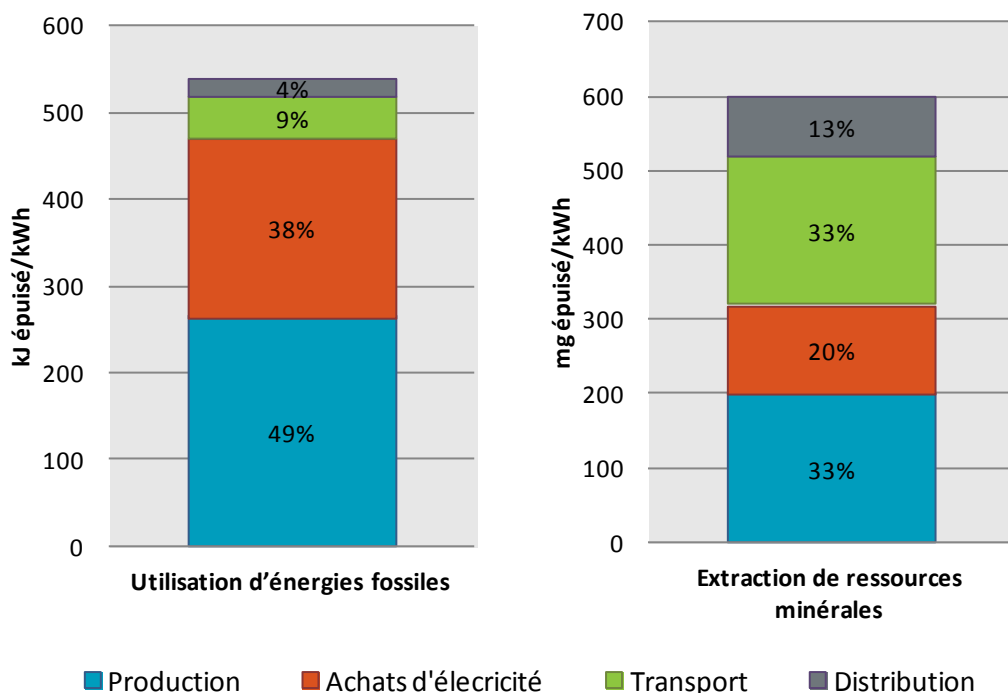


Figure 4-2 : Résultats des indicateurs *Utilisation d'énergies fossiles* et *Extraction de ressources minérales* associés à la production et l'achat, le transport et la distribution de 1 kWh d'électricité au Québec, par le réseau principal d'Hydro-Québec, en 2012 (méthode IMPACT World+).

L'indicateur *Utilisation d'énergies fossiles* (Figure 4-2) suit les mêmes tendances que celles du *Changement climatique*. Largement dominés par la production de l'électricité provenant du parc d'Hydro-Québec et des achats d'électricité, les impacts proviennent néanmoins de causes très différentes. L'extraction de l'uranium utilisé dans les différentes centrales nucléaires (de Gentilly-2 et de l'extérieur du Québec) contribue ainsi à plus de 75 % de l'impact sur l'*Utilisation d'énergies fossiles*. D'autres ressources fossiles (le charbon et le gaz naturel), utilisées lors de la production d'électricité achetée par Hydro-Québec, contribuent à 14 % de l'impact total. Le

pétrole, utilisé dans l'ensemble du système contribue également à 9 % des impacts sur l'*Utilisation d'énergies fossiles*.

L'indicateur *Extraction de ressources minérales* présente des tendances différentes des autres indicateurs. Dans ce cas-ci, les impacts proviennent majoritairement de l'utilisation de métaux, et plus spécifiquement de l'extraction de fer (80 % de l'impact total). Le fer est utilisé pour la production d'acier servant à la construction des infrastructures et équipements utilisés dans toutes les divisions d'Hydro-Québec. Par conséquent, la contribution est répartie entre les divisions et seul le groupe *Distribution* contribue plus minoritairement (13 % du total), puisque ses infrastructures sont basées principalement sur le bois (poteaux) et l'aluminium (câbles).

4.3.2 Filières de production hydroélectrique d'Hydro-Québec

Deux types de centrales sont présents dans le parc de production d'Hydro-Québec : les centrales à réservoir et les centrales au fil de l'eau. Leurs profils environnementaux sont très différents dus à la présence des réservoirs et aux émissions de GES qui y sont associées. Les impacts du cycle de vie des centrales (qui excluent le transport et la distribution de l'électricité produite) ont été évalués à l'aide de la méthode européenne CML, afin de rendre les résultats comparables à ceux retrouvés plus couramment dans la littérature. Il est à noter que la fin de vie des barrages et des infrastructures de rétention n'est pas considérée dans l'étude, ce qui est aussi le cas pour une partie des résultats de la littérature.

La Figure 4-3 présente les résultats pour les indicateurs de la méthode CML 2001 pour les centrales à réservoir. Les résultats sont présentés en contributions relatives de chaque élément du cycle de vie considéré (construction de la centrale elle-même, construction des ouvrages associés et exploitation des installations). En général, la construction de la centrale et des ouvrages associés apparaît comme le principal contributeur aux impacts, avec des contributions de plus de 65 %, et ce, pour tous les indicateurs sauf l'*Extraction minérale* et *Changement climatique*. La production et le transport des matériaux, ainsi que les opérations de construction des centrales et des ouvrages de rétention sont les principales sources d'impact pour tous les indicateurs où la construction des infrastructures domine. Dans le cas de l'*Extraction minérale*, les impacts proviennent principalement de l'extraction de métaux tel le cadmium, utilisés dans la production d'équipements associés au fonctionnement de la centrale (batteries, condensateurs, etc.). L'indicateur *Changement climatique* est pour sa part dominé par les émissions de CO₂ qui ont lieu principalement pendant les dix premières années suivant la mise en eau des réservoirs; c'est pourquoi l'étape d'exploitation domine avec une contribution de plus de 80 %.

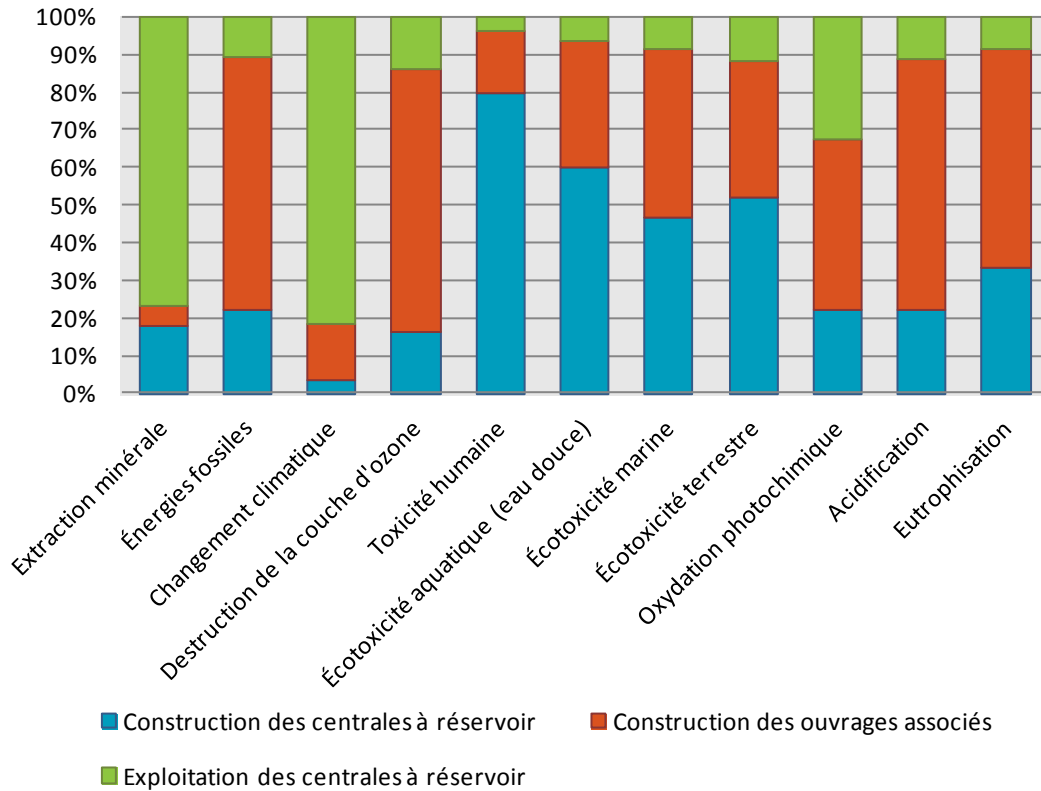


Figure 4-3 : Contribution relative des éléments des centrales à réservoir d'Hydro-Québec (méthode CML).

La Figure 4-4 présente les résultats pour les indicateurs de la méthode CML pour les centrales au fil de l'eau. De manière identique à la Figure 4-3, les résultats sont présentés en termes de contributions relatives de chaque élément du cycle de vie considéré (construction de la centrale elle-même, construction des ouvrages associés –digues de retenue et barrages- et exploitation des installations). En général, la contribution des différents éléments est similaire à celle des centrales avec réservoir, à l'exception de l'indicateur *Changement climatique*. L'absence de réservoir et des émissions de CO₂ associées conduit à une contribution aux impacts beaucoup plus faible de la phase d'exploitation pour cet indicateur. Les étapes de construction de la centrale au fil de l'eau et des ouvrages associés apparaissent donc comme les principaux contributeurs au *Changement climatique*, comme pour tous les autres indicateurs excepté l'*Extraction minérale*. Pour cet indicateur, les impacts proviennent encore majoritairement des métaux utilisés pour la production d'équipements associés au fonctionnement de la centrale.

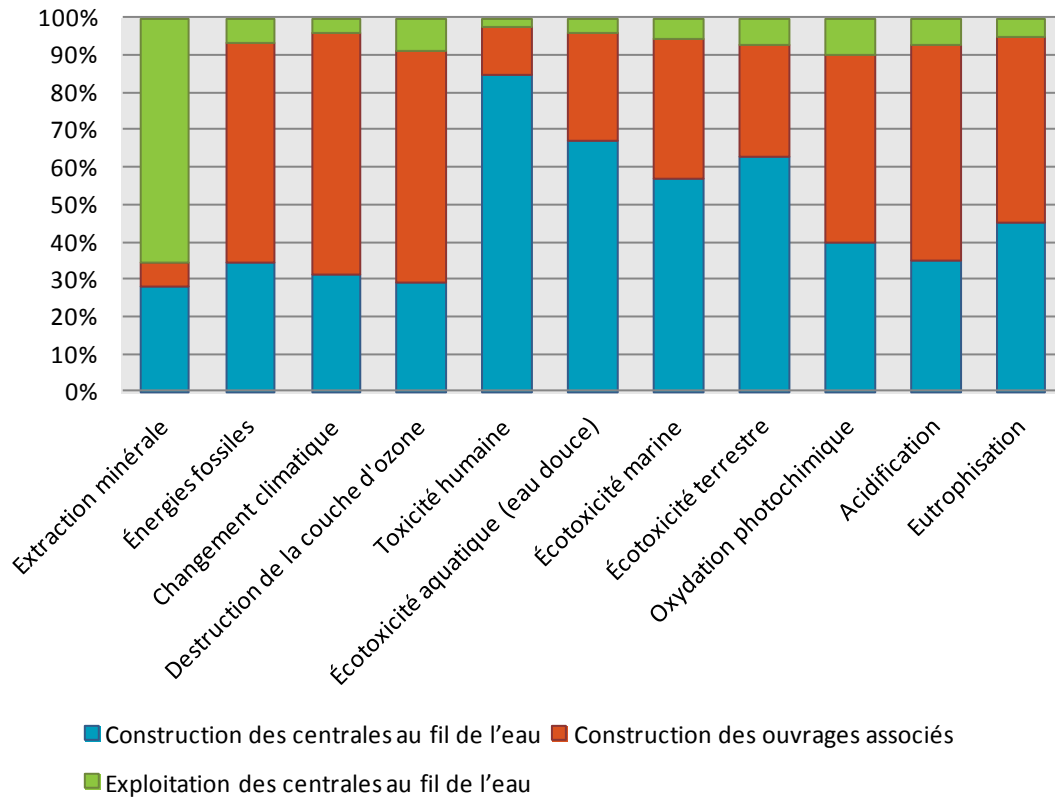


Figure 4-4 : Contribution relative des éléments des centrales au fil de l'eau d'Hydro-Québec (méthode CML).

5 Présentation des fiches comparatives

Ce chapitre présente la comparaison des impacts environnementaux des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique de certaines régions (pays, États, provinces) selon une approche cycle de vie.

Aux fins de cette étude, les **filières de production électrique** pour lesquelles il existait des données ACV récentes publiées (2007 ou plus récentes) et représentatives du contexte nord-américain ou de régions climatiques similaires ont été retenues.

Les **bouquets d'énergie électrique** ont, pour leur part, été tirés des données disponibles dans la base de données *ecoinvent* v3.0 ou la base de données de la U.S. Energy Information Administration. Ils représentent le pourcentage de chacune des filières de production composant le bouquet d'énergie électrique utilisées dans la région en 2008 ou 2012 (données les plus à jour disponibles).

Les fiches comparant les filières électriques et les bouquets d'énergie électrique sur la base d'indicateurs environnementaux sont présentées à l'Annexe A.

À noter que les fiches comparatives ont été conçues pour pouvoir être utilisées de manière autonome. Certains passages de texte sont donc répétés d'une fiche à l'autre afin de s'assurer que le lecteur dispose des informations nécessaires à la compréhension des résultats qui y sont présentés.

5.1 Indicateurs environnementaux retenus pour la comparaison

Sept indicateurs pour lesquels il existait suffisamment de données disponibles dans la littérature ont été retenus pour comparer les filières de production électrique :

1. **Changement climatique** : considère le potentiel de réchauffement associé aux émissions de gaz à effet de serre (GES) tout au long du cycle de vie.
2. **Destruction de la couche d'ozone** : considère les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) tout au long du cycle de vie.
3. **Acidification** : considère les émissions de substances acidifiantes tout au long du cycle de vie.
4. **Eutrophisation** : mesure les émissions de substances nutritives causant un déséquilibre et la dégradation du milieu aquatique tout au long du cycle de vie.
5. **Toxicité humaine** : prend en compte les émissions de substances ayant des effets toxiques tout au long du cycle de vie.
6. **Épuisement des ressources** : mesure l'utilisation des ressources non renouvelables, fossiles ou minérales, tout au long du cycle de vie. Pour la mesure de l'extraction des ressources minérales, les publications recensées emploient des méthodes d'évaluation différentes dont les résultats ne peuvent pas être combinés. Pour la production de la fiche, seules les publications ayant utilisé la méthode CML ont été considérées.
7. **Oxydation photochimique (smog)** : mesure les substances contribuant à la formation d'ozone troposphérique (smog d'été), sur l'ensemble du cycle de vie.

Les indicateurs sont décrits plus en détail dans chacune des fiches. À noter que la grande majorité des études répertoriées a employé la méthode CML pour quantifier les indicateurs environnementaux des filières¹³. Bien que ce ne soit pas la méthode d'évaluation des impacts la plus récente (voir sous-section 3.1.1), les filières de production électrique disponibles dans la base de données *ecoinvent* v2.2 et la production hydroélectrique d'Hydro-Québec ont été analysées avec cette méthode (CML *baseline*, version mise à jour en avril 2013) de manière à produire des résultats d'indicateurs environnementaux comparables à ceux de la littérature.

À noter qu'il existe également des indicateurs liés à l'**écotoxicité** des substances. Un nombre suffisant de résultats était disponible dans la littérature, mais les méthodes actuellement disponibles pour quantifier ces indicateurs produisent des résultats peu robustes, dus à la caractérisation déficiente de l'impact des métaux dans l'environnement. Les indicateurs liés à l'écotoxicité ont donc été écartés de la présente analyse comparative, suivant la recommandation d'un regroupement d'experts dans le domaine (Aboussouan et coll., 2004).

Pour ce qui est des bouquets d'énergie électrique, ils ont été comparés à l'aide des données disponibles dans la base de données *ecoinvent* v3.0, tel que mentionné précédemment, et de la méthode d'évaluation des impacts la plus récente, IMPACT World+ v1.0. Quatre indicateurs ont été retenus pour les comparer :

1. **Changement climatique** : indicateur orienté « problème », qui représente le potentiel de réchauffement associé aux émissions de gaz à effet de serre (GES) tout au long du cycle de vie.
2. **Santé humaine** : indicateur orienté « dommage », qui regroupe un ensemble de catégories d'impacts ayant des effets potentiels sur la santé humaine, dont le réchauffement climatique présenté dans la fiche *Changement climatique*. Les autres catégories qui contribuent à cet indicateur sont : l'utilisation de l'eau, les effets respiratoires des substances organiques et inorganiques, les substances cancérigènes, et non-cancérigènes, les radiations ionisantes et l'appauvrissement de la couche d'ozone.
3. **Qualité des écosystèmes** : indicateur orienté « dommage », qui regroupe un ensemble de catégories d'impacts ayant des effets potentiels sur les écosystèmes, dont le réchauffement climatique présenté dans la fiche *Changement climatique*. Les autres catégories qui contribuent à cet indicateur sont : les acidifications aquatique (écosystèmes marins et d'eau douce) et terrestre, l'eutrophisation (écosystèmes marins et d'eau douce), l'écotoxicité en eau douce, l'utilisation des terres, l'utilisation de l'eau, pollution thermique et radiations ionisantes.
4. **Épuisement des ressources** : indicateur orienté « problème », qui mesure l'utilisation des ressources non renouvelables, fossiles ou minérales, tout au long du cycle de vie.

Dès que possible, les comparaisons de filières et de bouquets d'énergie électrique ont été regroupées dans des fiches communes. En tout, neuf fiches comparatives, dont la liste est détaillée au Tableau 5-1, sont présentées à l'Annexe A.

¹³Les déclarations environnementales de produits (DEP) utilisent également la méthode CML (www.environdec.com/en/The-International-EPD-System/General-Programme-Instructions/Recommended-characterisation-factors/#.U2fgYFegWZg)

Tableau 5-1 : Liste des fiches comparatives des filières de production et des bouquets d'énergie électrique

Fiche	Comparaison des filières de production électrique	Comparaison des bouquets d'énergie électrique
Base de données ICV	<i>ecoinvent 2.2</i>	<i>ecoinvent 3.01</i>
Méthode d'ÉICV	<i>CML V3.01</i>	<i>IMPACT WORLD+</i>
Changement climatique	X	X
Destruction de la couche d'ozone	X	
Acidification	X	
Eutrophisation	X	
Toxicité humaine	X	
Oxydation photochimique (smog)	X	
Épuisement des ressources	X	X
Santé humaine		X
Qualité des écosystèmes		X

5.2 Comparaison des filières de production électrique

Les références utilisées pour quantifier les impacts environnementaux potentiels des filières de production électrique sont listées dans le Tableau 5-2.

Chaque fiche présente les résultats associés à un indicateur environnemental en particulier. Un diagramme à barres y résume l'ensemble des informations répertoriées dans la littérature. Pour chacune des filières disponibles, la médiane¹⁴ de l'indicateur est présentée par kWh d'électricité produite et la variabilité au sein d'une même filière est illustrée à l'aide de barres d'incertitudes indiquant la plage des valeurs rapportées dans les références retenues (du minimum au maximum). De plus, un tableau qui inclut d'autres informations statistiques (moyenne, nombre de points par filière, valeur maximale et minimale) est présenté avec le diagramme de barres.

Cette variabilité dépend d'un ensemble de facteurs dont :

- **la technologie évaluée** : pour une même filière de production, plusieurs technologies existent. Par exemple, les centrales thermiques au gaz peuvent être à cycle simple ou à cycle combiné et avoir ou non un système de captage du CO₂¹⁵ (rare actuellement). Les éoliennes et les centrales solaires, celles utilisant la biomasse et les centrales nucléaires

¹⁴ La médiane présente la valeur qui divise un groupe de données en deux parties égales : une partie avec la moitié des valeurs inférieures et une partie avec les valeurs supérieures. Cette information a été privilégiée face à la moyenne car elle est moins influencée par les valeurs extrêmes.

¹⁵ Dans le cas de la filière gaz naturel, les centrales à cycle combiné présentent, en général, des impacts plus faibles que les centrales classiques, principalement grâce à leur plus grande efficacité. De même, la présence d'un système de captage de carbone (possible dans les filières gaz naturel et charbon) réduit les émissions de CO₂, mais augmente la consommation de ressources et les émissions d'autres substances à l'environnement, du fait de l'ajout d'une étape de traitement.

présentent également une variété de technologies évaluées. Le biogaz peut également être généré par la méthanisation de plusieurs matières premières (résidus agricoles, déchets municipaux, etc.), utilisant diverses technologies.

- **le combustible utilisé** : dans le cas des centrales thermiques au charbon, certaines brûlent de l'antracite (*hard coal*) et d'autres du lignite. Les systèmes de production électrique à partir de biomasse utilisent aussi plusieurs types d'intrants (essences de bois diverses, résidus agricoles, etc.). Lorsque le pouvoir calorifique et la composition du combustible sont différents, les émissions liées à la production d'un kilowattheure d'électricité changent également.
- **la cogénération** : certaines filières produisent en même temps de l'électricité et de la chaleur ou de la vapeur. C'est notamment le cas de certaines centrales thermiques à combustibles fossiles ou à biomasse. Il est alors nécessaire de diviser les impacts environnementaux totaux et d'en attribuer une partie à la production d'électricité. La méthode d'imputation choisie aura un effet sur les résultats. L'impact de l'imputation est marqué dans le cas des filières thermique à charbon et à biomasse, où les technologies générant des coproduits présentent des résultats d'indicateurs plus faibles que la moyenne de leurs filières respectives.
- **l'année de production** : L'entreprise Vattenfall, un important producteur d'énergie en Europe, publie et met à jour des déclarations environnementales de produits (connues sous le sigle EPD en anglais) sur la production électrique de ses centrales. Il est ainsi possible de constater que pour une même centrale, il existe une variabilité entre les années (voir Vattenfall, 2010 et 2013a par exemple)¹⁶. Puisque les données comparées dans les fiches sont tirées de publications allant de 2007 à 2014, une certaine part de variabilité provient nécessairement de l'année de production évaluée.
- **la méthode d'évaluation des impacts** : tel que discuté à la section 3.1.1, il existe plusieurs méthodes ÉICV qui utilisent des modèles pour traduire les émissions en impacts environnementaux potentiels. Les indicateurs comparés dans les fiches viennent parfois d'études ayant employé des méthodes différentes, ce qui engendre une variabilité dans les résultats. Le logiciel utilisé pour réaliser l'analyse peut également avoir un impact sur les résultats obtenus.
- **provenance des combustibles** : chaque étude vient avec son lot de considérations spécifiques employées pour modéliser la production d'électricité. Parmi celles-ci, les distances et modes de transport considérés pour apporter les combustibles de leur lieu d'extraction ou de production jusqu'à la centrale électrique affectent les résultats de certains indicateurs. L'origine des combustibles (pays, région) influence également les impacts attribuables à l'approvisionnement, en raison de la diversité des technologies d'extraction ou de traitement qui y sont employées.
- **l'exhaustivité de l'inventaire utilisé** : la liste des matériaux consommés et des substances émises à l'environnement n'est pas toujours aussi complète d'une étude à l'autre, se traduisant par des impacts associés à la construction et à l'exploitation des infrastructures plus ou moins importants selon les publications. C'est le cas notamment des émissions de GES des réservoirs qui n'ont pas été pris en compte dans certaines études.

¹⁶ À noter que lorsque plusieurs résultats concernaient la même centrale, seules les données les plus récentes ont été employées dans la compilation des résultats.

- **le nombre d'études disponibles.** Dans certains cas, une seule source est disponible pour caractériser une filière pour un indicateur donné. Dans ce cas, aucune barre d'incertitude n'est affichée.

**Tableau 5-2 : Références utilisées pour quantifier
les impacts environnementaux potentiels des filières de production électrique**

Auteurs (année)	Filières étudiées (nombre de technologies)	Contexte géographique	Méthode	Indicateurs évalués ¹⁷
Ardente et coll. (2008)	Éolienne (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC
Arnoy et coll. (2013)	Hydroélectricité, fil de l'eau (1)	Europe	CML	CC, DCO, Acid, Eutr, OPC
Axpo New Energies (2008)	Biogaz (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC, Acid, Eutr, ENR
Axpo (2010)	Hydroélectricité, réservoir (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC, Acid, Eutr, ENR
Axpo (2011)	Biogaz (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC, Acid, Eutr, ENR
Axpo (2012)	Hydroélectricité, fil de l'eau (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC, Acid, Eutr, ENR
Axpo nuclear energy (2011)	Nucléaire (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC, Acid, Eutr, ENR
Badea et coll. (2010)	Thermique-Charbon (1) Thermique-Gaz naturel (1) Nucléaire (1)	Europe	CML	CC, ExtrMin, Acid, OPC, Eutr
Bauer (2007)	Biomasse (4), imputation énergie et exergie	Suisse	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Beerten et coll. (2009)	Nucléaire (3)	Europe Océanie	IPCC	CC
Bellerive (2009)	Thermique-Gaz naturel (2) Thermique-Charbon (2)	Europe	IMPACT 2002+	CC, DCO, Acid, UtilTer, ENR, ExtrMin, Cancer, Non-Cancer, Resp., EcotoxA, EcotoxT, Eutr, Rad
Bolliger et coll. (2007)	Hydroélectricité, fil de l'eau (1) Hydroélectricité, réservoir (2)	Europe	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Burger et Bauer (2007)	Éolienne (2)	OCE Europe	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Burkhardt et coll. (2012)	Solaire thermodynamique (2)	US	CED IPCC	ENR, CC

¹⁷ CC : Changement climatique
ENR : Énergie non renouvelable
ToxHum : Potentiel de toxicité humaine
Eutr : Eutrophisation
ExtrMin : Extraction minérale
Non-Cancer : Effets non-cancérigènes
EcotoxA : Potentiel d'écotoxicité aquatique
EcotoxM : Potentiel d'écotoxicité marine
Human health : Santé humaine (approche « dommage »)
Resources : Consommation de ressources (approche « dommage »)

DCO : Destruction de la couche d'ozone
OPC : Potentiel d'oxydation photochimique
Acid : Acidification
UtilTer : Utilisation des terres
Cancer : Effets cancérigènes
Resp. : Effets respiratoires
EcotoxT : Potentiel d'écotoxicité terrestre
Rad : Radiations ionisantes
Ecosystem quality: Qualité des écosystèmes (approche « dommage »)

Auteurs (année)	Filières étudiées (nombre de technologies)	Contexte géographique	Méthode	Indicateurs évalués ¹⁷
Butnar et coll. (2010)	Biomasse (3)	Europe	CML	CC, Acid, ToxHum, DCO, ExtrMin, OPC
Crawford (2009)	Éolienne (1)	Australie	n.s.	CC
De Santoli et coll. (2010)	Solaire photovoltaïque (1)	Europe	ReCiPe	Human health, Ecosystem quality, Resources
Desideri et coll. (2012)	Solaire photovoltaïque (1)	Europe	EI99	CC
Desideri et coll. (2013)	Solaire photovoltaïque (2)	Europe	EI99	CC
Ding et coll. (2013)	Thermique-Gaz naturel (1) Thermique-Charbon (2)	Asie	n.s.	CC
Dolan (2007)	Éolienne (1) Thermique-Charbon (2) Thermique-Gaz naturel (1)	US	n.s. Allan and Shonnard 2002	CC, Acid
Dones et coll. (2009)	Nucléaire (3)	US Europe(UCTE) Suisse	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
DONG energy (2008)	Éolienne (1)	Europe	IPCC	CC
EIAqua (2009)	Hydroélectricité, réservoir (1)	Europe	CML	CC, DCO, OPC, Acid, Eutr, ENR
Faist Emmenegger et coll. (2007)	Thermique-Gaz naturel (9)	Europe	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Faix et coll. (2010)	Biomasse (1) Thermique-Mazout (1)	Europe	CML	CC, Eutr, Acid, OPC, DCO
Frick et coll. (2010)	Géothermique (1)	Europe	n.s.	CC, ENR, Eutr, Acid
Froese et coll. (2010)	Thermique-Charbon (2)	US	IPCC CED	CC, ENR
Garcia-Valverde et coll. (2009)	Solaire photovoltaïque (1)	Europe	n.s.	CC
Garrett et coll. (2012)	Éolienne (1)	Europe	CML	CC, Acid, Eutr, EcotoxA, EcotoxT, ToxHum, EcotoxM, OPC, ExtrMin, ENR
Guest et coll. (2011)	Biomasse (3)	Europe	CML	CC, OPC, DCO, Eutr, Acid, EcotoxT, EcotoxM, EcotoxA, ToxHum, ExtrMin
Jacobson (2009)	Solaire photovoltaïque (2) Éolienne (1) Géothermique (1) Hydroélectricité (1) Houlomotrice (1) Marémotrice (1) Nucléaire (1) Thermique-Charbon (1)	Monde	n.s.	CC
Jeswani (2011)	Thermique-Charbon (7) Biogaz (5)	Europe	CML	CC, Acid, Eutr, OPC, ToxHum
Jungbluth (2007)	Thermique-Mazout (1)	CH	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Jungbluth et coll. (2009)	Solaire photovoltaïque (11)	CH	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr

Auteurs (année)	Filières étudiées (nombre de technologies)	Contexte géographique	Méthode	Indicateurs évalués ¹⁷
Kabir et coll. (2012)	Éolienne (1)	Canada	IPCC n.s.	CC, Acid, ENR
Karlsdottir et coll. (2010)	Géothermique (1)	Europe	CML	CC
Koornneef et coll. (2008)	Thermique-Charbon (3)	Europe	CML	CC, ExtrMin, OPC, ToxHum, EcotoxA, EcotoxT, EcotoxM, DCO, Acid, Eutr
Koroneos et coll. (2008)	Solaire thermodynamique (1)	Europe	EI95	CC, Acid, Eutr, DCO, OPC
Lechon et coll. (2008)	Solaire thermodynamique (2)	Europe	CML	CC, ExtrMin, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Lecoite et coll. (2007)	Nucléaire (1)	Europe	IPCC	CC
Martinez et coll. (2009)	Éolienne (1)	Europe	CML	ExtrMin, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Odeh and Cockerill (2008)	Thermique-Charbon (3) Thermique-Gaz naturel (4)	Europe	IPCC	CC
Penht and Henkel (2009)	Thermique-Charbon (5)	Europe	CML	ENR, CC, OPC, Eutr, Acid
Piemonte et coll. (2010)	Solaire thermodynamique (1)	Europe	CML	CC, DCO, ToxHum, Acid, Eutr
Reich-Weiser et coll. (2008)	Solaire photovoltaïque (1)	Europe, US	n.s.	CC
Ribeiro et coll. (2010)	Hydroélectricité (1)	Brésil	IPCC	CC
Röder et coll. (2007)	Thermique-Charbon (5)	UCTE NORDEL CENTREL	CML	ExtrMin, ENR, CC, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Roedl (2010)	Biomasse (1)	Europe	CML	CC, Eutr, Acid, OPC
Rule et coll. (2009)	Géothermique (1) Hydroélectricité (1) Marémotrice (1) Éolienne (1)	N. Zélande	n.s.	CC, ENR
Searcy et coll. (2008)	Biomasse (2) Thermique-Charbon (1)	AmN	IPCC	CC
Singh et coll. (2011)	Thermique-Gaz naturel (2)	Europe	CML	CC, Acid, OPC, Resp, ToxHum, EcotoxT, EcotoxA, EcotoxM
Sorensen et coll. (2008)	Marémotrice (1)	Europe	IPCC	CC
Stopatto (2008)	Solaire photovoltaïque (1)	Europe	n.s.	CC
Styles et coll. (2007)	Biomasse (2) Thermique-Charbon (2)	Europe	IPCC	CC
Tirado et coll. (2014)	Hydroélectricité (2) Nucléaire (1)	Canada	IMPACT 2002+, CML, IW+	CC, Santé humaine, Qualité des écosystèmes, ENR, ExtrMin, DCO, ToxHum, EcotoxA, EcotoxM, EcotoxT, OPC, Acid, Eutr
Tiwary et. Colls (2010)	Biomasse (5)	Europe	IPCC	CC
Tremeac et Meunier	Éolienne (1)	Europe	IMPACT	CC, Santé humaine, Qualité

Auteurs (année)	Filières étudiées (nombre de technologies)	Contexte géographique	Méthode	Indicateurs évalués ¹⁷
(2009)			2002+	des écosystèmes, ENR
Vattenfall (2011)	Hydroélectricité (1)	Europe	CML	CC, DCO, Acid, OPC, Eutr
Vattenfall (2013a)	Nucléaire (1)	Europe	CML	CC, Acid, OPC, Eutr
Vattenfall (2013b)	Éolienne (1)	Europe- Amer du Nord	CML	CC, DCO, Acid, OPC, Eutr
Vattenfall (2013c)	Éolienne (1)	Europe-UK	CML	CC, Acid, OPC, Eutr
Vattenfall (2014)	Nucléaire (2)	Europe	CML	CC, Acid, OPC, Eutr
Viebahn et coll. (2008)	Solaire thermodynamique (2)	Europe	n.s.	CC
Wagner et coll. (2011)	Éolienne (1)	Europe	n.s.	ENR, CC, Eutr, ToxHum, OPC, Acid
Whitaker et coll. (2013)	Solaire thermodynamique (1)	US	IPCC CED	CC, ENR
Woolcombe-Adams et coll. (2009)	Marémotrice (1)	Europe	n.s.	CC

6 Références

6.1 Références générales

- ABOUSSOUAN, L., VAN DE MEENT, D., SCHÖNNENBECK, M., HAUSCHILD, M., DELBEKE, K., STRUIJS, J., RUSSELL, A., UDO DE HAES, H., ATHERTON, J., VAN TILBORG, W., KARMAN, C., KORENROMP, R., SAP, G., BAUKLOH, A., DUBREUIL, A., ADAMS, W., HEIJUNGS, R., JOLLIET, O., DE KONING, A., CHAPMAN, P., LIGTHART, T., VERDONCK, F., VAN DER LOOS, R., EIKELBOOM, R. et KUYPER, J. (2004). Declaration of Apeldoorn on LCIA of Non-Ferrous Metals. 15 avril 2004, Apeldoorn, Pays-Bas. En ligne : http://www.zinc.org/general/apeldoorn_declaration.pdf [page consultée le 25 juin 2014].
- BARE, J. C., NORRIS, G. A., PENNINGTON, D. W., MCKONE, T. (2002). TRACI : The Tool for the Reduction and Assessment of Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6 (3&4), 49-78.
- COMBS, S. (2008). The Energy Report 2008. Chapter 27 : Electricity. *The Energy Report 2008. Chapter 27 : Electricity*. Texas Comptroller of Public Accounts. En ligne : <http://www.window.state.tx.us/specialrpt/energy/uses/electricity.php> [page consultée le 21 mai 2014].
- ECOINVENT CENTRE (Internet). The ecoinvent Database. Présentation en ligne : <http://www.ecoinvent.org/database/> [page consultée le 22 mai 2014].
- EDF (2013a) La biomasse. En ligne : <http://energie.edf.com/energies-nouvelles/biomasse-47908.html> [page consultée le 22 mai 2014].
- EDF (2013b). Comment fonctionne une centrale photovoltaïque? En ligne : <http://jeunes.edf.com/article/comment-fonctionne-une-centrale-photovoltaïque,173> [page consultée le 22 mai 2014].
- EDF (2102). Une technologie dévoilée. Le solaire thermodynamique à concentration. Publication EDF R&D, Juin 2012. 4 pages. En ligne : <http://chercheurs.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/Publications/technodevoilee/technologie devoilee 01 internet.pdf> [page consultée le 22 mai 2014].
- GOEDKOOP, M.J, SPRIENSMA, R. (2001). The Eco-indicator 99 - A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment - Methodology Report (3rd ed.) : PRé Consultants B.V. 144 pages.
- GOEDKOOP, M.J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A., STRUIJS, J. et VAN ZELM, R. (2009). ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition Report I: Characterisation; 6
- GUINÉE, J. B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., KONING, A., HUIJBREGTS, M. (2001). An operational guide to the ISO standards: Part A, Part B, Part 2B and Part 3. Ministry of Housing, spatial planning, and the Environment (VROM) and Centre of Environmental Science – Leiden University (CML).
- HAUSCHILD, M., et POTTING, J. (2003). Spatial differentiation in life cycle impact assessment: The EDIP2003 methodology Institute for Product Development Technical University of Denmark. 149 pages.
- HAYASHI, K., OKAZAKI, M., ITSUBO, N., INABA, A. (2004). Development of Damage Function of Acidification for Terrestrial Ecosystems Based on the Aluminum Toxicity on Net Primary Production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9, 13-22.
- HYDRO-QUÉBEC (2014). Communication personnelle avec C. Turpin (12 septembre 2014).

- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published : IGES, Japan.
- IPCC (2011). IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, En ligne : <http://srren.ipcc-wg3.de/report> [page consultée le 21 mai 2014].
- 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 Life Cycle Assessment 8(6) p.324-330.
- LEONARDO ACADEMY, (2012). LEO-SCS-002: Life Cycle Impact Assessment Framework and Guidance for Establishing Public Declarations and Claims, 36 Pages
- MOOMAW, W., BURGHERR, P., HEATH, G., LENZEN, M., NYBOER, J., BERBRUGGEN, A. (2011). Annex II: Methodology. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (p. 973-1000). En ligne : http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Annex_II.pdf [page consultée le 30 mai 2014].
- PLANÈTE ÉNERGIES (2013a). Les voies du futur – L'énergie des marées. Texte daté du 10 décembre 2013. En ligne : <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-demain/les-voies-du-futur/l-energie-des-oceans/les-marees-une-energie-au-rendez-vous-301.html> [page consultée le 22 mai 2014].
- PLANÈTE ÉNERGIES (2013b). Les voies du futur – Les vagues, un mouvement perpétuel. Texte daté du 10 décembre 2013. En ligne : <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-demain/les-voies-du-futur/l-energie-des-oceans/les-vagues-un-mouvement-a-exploiter-303.html> [page consultée le 22 mai 2014].
- PLANÈTE ÉNERGIES (2013c). Les voies du futur – L'eau salée, moteur de l'énergie osmotique. Texte daté du 16 avril 2013. En ligne : <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-demain/les-voies-du-futur/l-energie-des-oceans/l-energie-osmotique-600138.html>
- PLANÈTE ÉNERGIES (2013d). Les voies du futur – La mer, une réserve de chaleur inexploitée. Texte daté du 10 décembre 2013. En ligne : <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-demain/les-voies-du-futur/l-energie-des-oceans/l-energie-thermique-des-oceans-307.html> [page consultée le 22 mai 2014].
- PLANÈTE ÉNERGIES (2013e). Les voies du futur – Les courants marins, un potentiel considérable. Texte daté du 10 décembre 2013. En ligne : <http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-demain/les-voies-du-futur/l-energie-des-oceans/les-courants-marins-une-force-motrice-305.html> [page consultée le 22 mai 2014].
- TIRADO SECO, P., DUSSAULT, M., FALLAHA, S., MICHAUD, R., SAMSON, R. (2014). Analyse du cycle de vie de la production, du transport et de la distribution d'électricité au Québec. Rapport technique. CIRAIQ. Mai 2014. 45 pages.
- VATTENFALL (2010). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant. S-P 00021, 2010-12-16, Vattenfall AB Nuclear Power, Sweden, 83 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7310/epd21.pdf> [page consultée le 26 juin 2014].
- VATTENFALL (2013a). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant. Version 1.2 S-P 0021 2013-03-27. Vattenfall AB Nuclear Power, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9914/epd21_Vattenfall_Forsmark_Nuclear_Power_Plant_2014-03-27.pdf [page consultée le 26 juin 2014].

6.2 Fiche comparative — Changement climatique

1. ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M. et LO BRANO, V. (2008). Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), p 200–217.
2. ARNØY, S. et MODAHL, I.S. (2013). Life Cycle Data for Hydroelectric Generation at Embretsfoss 4 (E4) Power Station. Background Data for Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Product Declaration (EPD). 39 pages. En ligne : <http://ostfoldforskning.no/uploads/dokumenter/publikasjoner/703.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
3. AXPO (2010). Environmental Product Declaration: Löntsch high head storage power plant, 26 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8611/epd332.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
4. AXPO (2011). Environmental Product Declaration: Otelfingen Kompogas Facility, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8789/epd176_Axpo_Otelfingen_Kompogas_Facility_2012.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
5. AXPO (2012). Environmental Product Declaration: Wildegg-Brugg run-of-river Power Plant, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9037/epd205_Axpo_Wildegg_Brugg.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
6. AXPO NEW ENERGIES (2008). Environmental Product Declaration: Genesys Plant Busslingen, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8319/epd263en.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
7. AXPO NUCLEAR ENERGY (2011). Environmental Product Declaration: Beznau Nuclear Power Plant - Update 2011, 40 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7562/epd144en_v2.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
8. , I. et DINCA, C.F. (2010). Comparative Analysis Of Coal, Natural Gas And Nuclear Fuel Life Cycles By Chains Of Electrical Energy Production. U.P.B. Sci. Bull., Series C 72(2), 221-238.
9. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].
10. BEERTEN, J., LAES, E., MESKENS, G. et D'HAESELEER, W. (2009). Greenhouse gas emissions in the nuclear life cycle: A balanced appraisal. *Energy Policy*, 37(12), 5056-5068.
11. BELLERIVE, N. (2009). Comparaison de la performance environnementale de la production thermique d'électricité avec et sans séquestration géologique du dioxyde de carbone. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal (Canada). M.Sc.A.
12. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
13. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
14. BURKHARDT, J.J., HEATH, G. et COHEN, E. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Trough and Tower Concentrating Solar Power Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 16(SUPPL.1), S93-S109.

15. BUTNAR, I., RODRIGO, J., GASOL, C.M. et CASTELLS, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. *Biomass & Bioenergy*, 34(12), 1780-1788.
16. CRAWFORD, R.H. (2009). Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2653–2660.
17. DESIDERI, U., PROIETTI, S., ZEPPARELLI, F., SDRINGOLA, P. et BINI, S. (2012). Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kW p photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. *Applied Energy*, 97, 944-955.
18. DESIDERI, U., ZEPPARELLI, F., MORETTINI, V. et GARRONI, E. (2013). Comparative analysis of concentrating solar power and photovoltaic technologies: Technical and environmental evaluations. *Applied Energy*, 102, 765-784.
19. DING, Y.J., HAN, W.J., CHAI, Q.H., YANG, S.H. et SHEN, W. (2013). Coal-based synthetic natural gas (SNG): A solution to China's energy security and CO2 reduction? *Energy Policy*, 55, 445-453.
20. DOLAN, S.L. (2007). Life cycle assessment and energy synthesis of a theoretical offshore wind farm for Jacksonville, Florida, University of Florida. Master of science, 125 pages.
21. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, part VII – nucléaire].
22. DONG Energy. (2008). Life cycle approaches to assess emerging energy technologies: Final report on offshore wind technology. Fredericia, Denmark. New Energy Externalities Developments for Sustainability, 60 pages.
23. ELAQUA AG (2009). Environmental Product Declaration. Au-Schönenberg Small-Scale Hydro Power Plant, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7871/epd262.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
24. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
25. FAIX, A., SCHWEINLE, J., SCHÖLL, S., BECKER, G. et MEIER, D. (2010). (GTI-tcbiomass) Life-cycle assessment of the BTO® process (biomass-to-oil) with combined heat and power generation. *Environmental progress & sustainable energy*, 29(2), 193-202.
26. FRICK, S., KALTSCHMITT, M. et SCHROEDER, G. (2010). Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy*, 35(5), 2281-2294.
27. FROESE, R. E., SHONNARD, D. R., MILLER, C. A., KOERS, K. P. et JOHNSON, D. M. (2010). An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes States. *Biomass and Bioenergy*, 34, 251–262.
28. GARCIA-VALVERDE, R., MIGUEL, C., MARTINEZ-BEJAR, R. et URBINA, A. (2009). Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system. *Solar Energy*, 83(9), 1434–1445.
29. GARRETT, P. et RØNDE, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.
30. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 908-921.
31. JACOBSON, M.Z. (2009). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*, 2, 148–173.
32. JESWANI, H.K., GUJBA, H. et AZAPAGIC, A. (2011). Assessing Options for Electricity Generation from Biomass on a Life Cycle Basis: Environmental and Economic Evaluation. *Waste and Biomass Valorization*, 2(1), 33-42.
33. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au mazout].

34. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïque].
35. KABIR, M.R., ROOKE, B., DASSANAYAKE, G.D.M. et FLECK, B.A. (2012). Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation. Renewable Energy, 37(1), 133-141.
36. KARLSDOTTIR, M.R., PALSSON, O.P. et PALSSON, H. (2010). Factors for Primary Energy Efficiency and CO2 Emission of Geothermal Power Production. World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
37. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO2. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(4), 448-467.
38. KORONEOS, C.J., PIPERIDIS, S.A., TATATZIKIDIS, C.A. et ROVAS, D.C. (2008). Life Cycle Assessment of a Solar Thermal Concentrating System, WSEAS Conferences in Spain. September 2008 209-217
39. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 130(2) 0210121-0210127.
40. LECOINTE, C., LECARPENTIER, D., MAUPU, V., LE BOULCH, D. et RICHARD, R. (2007). Final report on technical data, costs and life cycle inventories of nuclear power plants. Rome, Italy, New Energy Externalities Developments for Sustainability, 62 pages.
41. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. International Journal of Life Cycle Assessment, 14(1), 52-63.
42. ODEH, N.A. et COCKERILL, T.T. (2008). Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. Energy Policy, 36(1), 367-380.
43. PEHNT, M. et HENKEL, J. (2009). Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(1), 49-66.
44. PIEMONTE, V., DE FALCO, M., TARQUINI, P. et GIACONIA, A. (2010). Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. Computer Aided Chemical Engineering 28 1063-1068, En ligne : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650294050&partnerID=40&md5=36d8f426cf32c5edf2756200c6d2236c> [page consultée le 9 avril 2014].
45. REICH-WEISER, C., FLETCHER, T., DORNFELD, D.A. et HORNE, S. (2008). Development of the Supply Chain Optimization and Planning for the Environment (SCOPE) tool - applied to solar energy. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, CA, ISEE.
46. RIBEIRO, F.D.M. et DA SILVA, G.A. (2010). Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. Journal of Cleaner Production, 18(1), 44-54.
47. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
48. ROEDL, A. (2010). Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice—a life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(6), 567-578.
49. RULE, B.M., WORTH, Z.J. et BOYLE, C.A. (2009). Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand. Environ. Sci. Technol., 43(16), 6406–6413.
50. SEARCY, E. et FLYNN, P.C. (2008). Processing of Straw/Corn Stover: Comparison of Life Cycle Emissions. International Journal of Green Energy, 5(6), 14.

51. SINGH, B., STROMMAN, A.H. et HERTWICH, E. (2011). Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(3), 457-466.
52. SORENSEN, H.C. et NAEF, S. (2008). Report on Technical Specification of Reference Technologies (Wave and Tidal Power Plant). New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), Rome, Italy and SPOK Consult, Copenhagen, Denmark, 59 pages.
53. STOPPATO, A. (2008). Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. Energy, 33(2), 224-232.
54. STYLES, D. et JONES, M.B. (2007). Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity. Biomass and Bioenergy, 31, 759-772.
55. TIWARY, A. et COLLS, J. (2010). Mitigating secondary aerosol generation potentials from biofuel use in the energy sector. Science of the Total Environment, 408(3), 607-616.
56. TREMEAC, B. et MEUNIER, F. (2009). Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 2104-2110.
57. VATTENFALL (2011). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower, S-P-00088, 2011-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 63 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
58. VATTENFALL (2013a). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant. Version 1.2 S-P 0021 2013-03-27. Vattenfall AB Nuclear Power, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9914/epd21_Vattenfall_Forsmark_Nuclear_Power_Plant_2014-03-27.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
59. VATTENFALL (2013b). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Wind Farms. S-P-00183, 2013-02-01, Vattenfall AB, Sweden, 46 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9018/epd183_Vattenfall_Nordic_Wind_2013.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
60. VATTENFALL (2013c). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms in the UK. S-P-00515, 2013-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 42 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9781/epd517_Vattenfall_Wind_UK.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
61. VATTENFALL (2014). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Rinhals Nuclear Power Plant, version 1.2 S-P-00026, 2014-03-27, Vattenfall AB, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
62. VIEBAHN, P., KRONSHAGE, S., TRIEB, F. et LECHON, Y. (2008). Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants, Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006), 95. En ligne : <http://www.needs-project.org/docs/results/RS1a/RS1a%20D12.2%20Final%20report%20concentrating%20solar%20thermal%20power%20plants.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
63. WAGNER, H.-J., BAACK, C., EICKELKAMP, T., EPE, A., LOHMANN, J. et TROY, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. Energy, 36(5), 2459-2464.
64. WHITAKER, M.B., HEATH, G.A., BURKHARDT, J.J. et TURCHI, C.S. (2013). Life Cycle Assessment of a Power Tower Concentrating Solar Plant and the Impacts of Key Design Alternatives. Environmental Science & Technology, 47(11), 5896-5903.
65. WOOLLCOMBE-ADAMS, C., WATSON, M. et SHAW, T. (2009). Severn Barrage tidal power project: implications for carbon emissions. Water and Environment Journal, 23(1), 63-68.

6.3 Fiche comparative — Destruction de la couche d'ozone

1. ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M. et LO BRANO, V. (2008). Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 200–217.
2. ARNØY, S. et MODAHL, I.S. (2013). Life Cycle Data for Hydroelectric Generation at Embretsfoss 4 (E4) Power Station. Background Data for Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Product Declaration (EPD). 39 pages. En ligne : <http://ostfoldforskning.no/uploads/dokumenter/publikasjoner/703.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
3. AXPO (2010). Environmental Product Declaration: Löntsch high head storage power plant, 26 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8611/epd332.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
4. AXPO (2011). Environmental Product Declaration: Otelfingen Kompogas Facility, 21 pages En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8789/epd176_Axpo_Otelfingen_Kompogas_Facility_2012.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
5. AXPO (2012). Environmental Product Declaration: Wildegg-Brugg run-of-river Power Plant, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9037/epd205_Axpo_Wildegg_Brugg.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
6. AXPO NEW ENERGIES (2008). Environmental Product Declaration: Genesys Plant Busslingen, 24 pages En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8319/epd263en.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
7. AXPO NUCLEAR ENERGY (2011). Environmental Product Declaration: Beznau Nuclear Power Plant - Update 2011, 40 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7562/epd144en_v2.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
8. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].
9. BELLERIVE, N. (2009). Comparaison de la performance environnementale de la production thermique d'électricité avec et sans séquestration géologique du dioxyde de carbone. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal (Canada). M.Sc.A.
10. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
11. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
12. BUTNAR, I., RODRIGO, J., GASOL, C.M. et CASTELLS, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. *Biomass & Bioenergy*, 34(12), 1780-1788.
13. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII – nucléaire].
14. ELAQUA AG (2009). Environmental Product Declaration. Au-Schönenberg Small-Scale Hydro Power Plant, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7871/epd262.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].

15. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
16. FAIX, A., SCHWEINLE, J., SCHÖLL, S., BECKER, G. et MEIER, D. (2010). (GTI-tcbiomass) Life-cycle assessment of the BTO® process (biomass-to-oil) with combined heat and power generation. *Environmental progress & sustainable energy*, 29(2), 193-202.
17. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 908-921.
18. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au mazout].
19. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïque].
20. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 448-467.
21. KORONEOS, C.J., PIPERIDIS, S.A., TATATZIKIDIS, C.A. et ROVAS, D.C. (2008). Life Cycle Assessment of a Solar Thermal Concentrating System, WSEAS Conferences in Spain. September 2008 209-217
22. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 130(2) 0210121-0210127.
23. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1), 52-63.
24. PIEMONTE, V., DE FALCO, M., TARQUINI, P. et GIACONIA, A. (2010). Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. *Computer Aided Chemical Engineering* 28 1063-1068, En ligne : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650294050&partnerID=40&md5=36d8f426cf32c5edf2756200c6d2236c> [page consultée le 9 avril 2014].
25. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
26. VATTENFALL (2011). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower, S-P-00088, 2011-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 63 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
27. VATTENFALL (2013b) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Wind Farms. S-P-00183, 2013-02-01, Vattenfall AB, Sweden, 46 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9018/epd183_Vattenfall_Nordic_Wind_2013.pdf [page consultée le 26 juin 2014].

6.4 Fiche comparative — Acidification

1. ARNØY, S. et MODAHL, I.S. (2013). Life Cycle Data for Hydroelectric Generation at Embretsfoss 4 (E4) Power Station. Background Data for Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Product Declaration (EPD). 39 pages. En ligne : <http://ostfoldforskning.no/uploads/dokumenter/publikasjoner/703.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
2. AXPO (2010). Environmental Product Declaration: Löntschi high head storage power plant, 26 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8611/epd332.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
3. AXPO (2011). Environmental Product Declaration: Otelfingen Kompogas Facility, 21 pages En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8789/epd176_Axpo_Otelfingen_Kompogas_Facility_2012.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
4. AXPO (2012). Environmental Product Declaration: Wildegg-Brugg run-of-river Power Plant, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9037/epd205_Axpo_Wildegg_Brugg.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
5. AXPO NEW ENERGIES (2008). Environmental Product Declaration: Genesys Plant Busslingen, 24 pages En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8319/epd263en.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
6. AXPO NUCLEAR ENERGY (2011). Environmental Product Declaration: Beznau Nuclear Power Plant - Update 2011, 40 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7562/epd144en_v2.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
7. , I. et DINCA, C.F. (2010). Comparative Analysis Of Coal, Natural Gas And Nuclear Fuel Life Cycles By Chains Of Electrical Energy Production. U.P.B. Sci. Bull., Series C 72(2), 221-238.
8. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].
9. BELLERIVE, N. (2009). Comparaison de la performance environnementale de la production thermique d'électricité avec et sans séquestration géologique du dioxyde de carbone. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal (Canada). M.Sc.A.
10. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
11. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
12. BUTNAR, I., RODRIGO, J., GASOL, C.M. et CASTELLS, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. *Biomass & Bioenergy*, 34(12), 1780-1788.
13. DOLAN, S.L. (2007). Life cycle assessment and energy synthesis of a theoretical offshore wind farm for Jacksonville, Florida, University of Florida. Master of science, 125 pages.
14. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, part VII – nucléaire].

15. ELAQUA AG (2009). Environmental Product Declaration. Au-Schönenberg Small-Scale Hydro Power Plant, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7871/epd262.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
16. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
17. FAIX, A., SCHWEINLE, J., SCHÖLL, S., BECKER, G. et MEIER, D. (2010). (GTI-tcbiomass) Life-cycle assessment of the BTO® process (biomass-to-oil) with combined heat and power generation. *Environmental progress & sustainable energy*, 29(2), 193-202.
18. FRICK, S., KALTSCHMITT, M. et SCHROEDER, G. (2010). Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy*, 35(5), 2281-2294.
19. GARRETT, P. et RØNDE, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.
20. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 908-921.
21. JESWANI, H.K., GUJBA, H. et AZAPAGIC, A. (2011). Assessing Options for Electricity Generation from Biomass on a Life Cycle Basis: Environmental and Economic Evaluation. *Waste and Biomass Valorization*, 2(1), 33-42.
22. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermique au mazout].
23. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïque].
24. KABIR, M.R., ROOKE, B., DASSANAYAKE, G.D.M. et FLECK, B.A. (2012). Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation. *Renewable Energy*, 37(1), 133-141.
25. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 448-467.
26. KORONEOS, C.J., PIPERIDIS, S.A., TATATZIKIDIS, C.A. et ROVAS, D.C. (2008). Life Cycle Assessment of a Solar Thermal Concentrating System, WSEAS Conferences in Spain. September 2008 209-217
27. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 130(2) 0210121-0210127.
28. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1), 52-63.
29. PEHNT, M. et HENKEL, J. (2009). Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(1), 49-66.
30. PIEMONTE, V., DE FALCO, M., TARQUINI, P. et GIACONIA, A. (2010). Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. *Computer Aided Chemical Engineering* 28 1063-1068, En ligne : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650294050&partnerID=40&md5=36d8f426cf32c5edf2756200c6d2236c> [page consultée le 9 avril 2014].
31. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle

- Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
32. ROEDL, A. (2010). Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice—a life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(6), 567-578.
 33. SINGH, B., STROMMAN, A.H. et HERTWICH, E. (2011). Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(3), 457-466.
 34. VATTENFALL (2011). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower, S-P-00088, 2011-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 63 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 35. VATTENFALL (2013a). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant. Version 1.2 S-P 0021 2013-03-27. Vattenfall AB Nuclear Power, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9914/epd21_Vattenfall_Forsmark_Nuclear_Power_Plant_2014-03-27.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 36. VATTENFALL (2013b). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Wind Farms. S-P-00183, 2013-02-01, Vattenfall AB, Sweden, 46 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9018/epd183_Vattenfall_Nordic_Wind_2013.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 37. VATTENFALL (2013c). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms in the UK. S-P-00515, 2013-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 42 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9781/epd517_Vattenfall_Wind_UK.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 38. VATTENFALL (2014). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Rinhalts Nuclear Power Plant, version 1.2 S-P-00026, 2014-03-27, Vattenfall AB, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 39. WAGNER, H.-J., BAACK, C., EICKELKAMP, T., EPE, A., LOHMANN, J. et TROY, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. Energy, 36(5), 2459-2464.

6.5 Fiche comparative — Eutrophisation

1. ARNØY, S. et MODAHL, I.S. (2013). Life Cycle Data for Hydroelectric Generation at Embretsfoss 4 (E4) Power Station. Background Data for Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Product Declaration (EPD). 39 pages. En ligne : <http://ostfoldforskning.no/uploads/dokumenter/publikasjoner/703.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
2. AXPO (2010). Environmental Product Declaration: Löntsch high head storage power plant, 26 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8611/epd332.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
3. AXPO (2011). Environmental Product Declaration: Otelfingen Kompogas Facility, 21 pages En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8789/epd176_Axpo_Otelfingen_Kompogas_Facility_2012.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
4. AXPO (2012). Environmental Product Declaration: Wildegg-Brugg run-of-river Power Plant, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9037/epd205_Axpo_Wildegg_Brugg.pdf [page consultée le 9 avril 2014].

5. AXPO NEW ENERGIES (2008). Environmental Product Declaration: Genesys Plant Busslingen, 24 pages En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8319/epd263en.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
6. AXPO NUCLEAR ENERGY (2011). Environmental Product Declaration: Beznau Nuclear Power Plant - Update 2011, 40 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7562/epd144en_v2.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
7. , I. et DINCA, C.F. (2010). Comparative Analysis Of Coal, Natural Gas And Nuclear Fuel Life Cycles By Chains Of Electrical Energy Production. U.P.B. Sci. Bull., Series C 72(2), 221-238.
8. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].
9. BELLERIVE, N. (2009). Comparaison de la performance environnementale de la production thermique d'électricité avec et sans séquestration géologique du dioxyde de carbone. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal (Canada). M.Sc.A.
10. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
11. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
12. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, part VII – nucléaire].
13. ELAQUA AG (2009). Environmental Product Declaration. Au-Schönenberg Small-Scale Hydro Power Plant, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7871/epd262.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
14. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
15. FAIX, A., SCHWEINLE, J., SCHÖLL, S., BECKER, G. et MEIER, D. (2010). (GTI-tcbiomass) Life-cycle assessment of the BTO® process (biomass-to-oil) with combined heat and power generation. *Environmental progress & sustainable energy*, 29(2), 193-202.
16. FRICK, S., KALTSCHMITT, M. et SCHROEDER, G. (2010). Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy*, 35(5), 2281-2294.
17. GARRETT, P. et RØNDE, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.
18. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 908-921.
19. JESWANI, H.K., GUJBA, H. et AZAPAGIC, A. (2011). Assessing Options for Electricity Generation from Biomass on a Life Cycle Basis: Environmental and Economic Evaluation. *Waste and Biomass Valorization*, 2(1), 33-42.
20. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in

- Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au mazout].
21. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïques].
 22. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(4), 448-467.
 23. KORONEOS, C.J., PIPERIDIS, S.A., TATATZIKIDIS, C.A. et ROVAS, D.C. (2008). Life Cycle Assessment of a Solar Thermal Concentrating System, WSEAS Conferences in Spain. September 2008 209-217
 24. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 130(2) 0210121-0210127.
 25. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. International Journal of Life Cycle Assessment, 14(1), 52-63.
 26. PEHNT, M. et HENKEL, J. (2009). Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(1), 49-66.
 27. PIEMONTE, V., DE FALCO, M., TARQUINI, P. et GIACONIA, A. (2010). Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. Computer Aided Chemical Engineering 28 1063-1068, En ligne : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650294050&partnerID=40&md5=36d8f426cf32c5edf2756200c6d2236c> [page consultée le 9 avril 2014].
 28. RIBEIRO, F.D.M. et DA SILVA, G.A. (2010). Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. Journal of Cleaner Production, 18(1), 44-54.
 29. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
 30. ROEDL, A. (2010). Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice—a life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(6), 567-578.
 31. VATTENFALL (2011). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower, S-P-00088, 2011-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 63 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 32. VATTENFALL (2013a). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant. Version 1.2 S-P 0021 2013-03-27. Vattenfall AB Nuclear Power, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9914/epd21_Vattenfall_Forsmark_Nuclear_Power_Plant_2014-03-27.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 33. VATTENFALL (2013b) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Wind Farms. S-P-00183, 2013-02-01, Vattenfall AB, Sweden, 46 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9018/epd183_Vattenfall_Nordic_Wind_2013.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
 34. VATTENFALL (2013c) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms in the UK. S-P-00515, 2013-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 42 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9781/epd517_Vattenfall_Wind_UK.pdf [page consultée le 26 juin 2014].

35. VATTENFALL (2014) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Rinhals Nuclear Power Plant, version 1.2 S-P-00026, 2014-03-27, Vattenfall AB, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
36. WAGNER, H.-J., BAACK, C., EICKELKAMP, T., EPE, A., LOHMANN, J. et TROY, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. *Energy*, 36(5), 2459-2464.

6.6 Fiche comparative — Toxicité humaine

1. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].
2. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
3. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
4. BUTNAR, I., RODRIGO, J., GASOL, C.M. et CASTELLS, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. *Biomass & Bioenergy*, 34(12), 1780-1788.
5. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, part VII – nucléaire].
6. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
7. GARRETT, P. et RØNDE, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.
8. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 908-921.
9. JESWANI, H.K., GUJBA, H. et AZAPAGIC, A. (2011). Assessing Options for Electricity Generation from Biomass on a Life Cycle Basis: Environmental and Economic Evaluation. *Waste and Biomass Valorization*, 2(1), 33-42.
10. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermique au mazout].
11. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïque].
12. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 448-467.

13. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 130(2) 0210121-0210127.
14. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. International Journal of Life Cycle Assessment, 14(1), 52-63.
15. PIEMONTE, V., DE FALCO, M., TARQUINI, P. et GIACONIA, A. (2010). Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. Computer Aided Chemical Engineering 28 1063-1068, En ligne : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650294050&partnerID=40&md5=36d8f426cf32c5edf2756200c6d2236c> [page consultée le 9 avril 2014].
16. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
17. SINGH, B., STROMMAN, A.H. et HERTWICH, E. (2011). Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(3), 457-466.
18. WAGNER, H.-J., BAACK, C., EICKELKAMP, T., EPE, A., LOHMANN, J. et TROY, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. Energy, 36(5), 2459-2464.

6.7 Fiche comparative — Épuisement des ressources

1. AXPO (2010). Environmental Product Declaration: Löntsch high head storage power plant, 26 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8611/epd332.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
2. AXPO (2011). Environmental Product Declaration: Otelfingen Kompogas Facility, 21 pages En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8789/epd176_Axpo_Otelfingen_Kompogas_Facility_2012.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
3. AXPO (2012). Environmental Product Declaration: Wildegg-Brugg run-of-river Power Plant, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9037/epd205_Axpo_Wildegg_Brugg.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
4. AXPO NEW ENERGIES (2008). Environmental Product Declaration: Genesys Plant Busslingen, 24 pages En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8319/epd263en.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
5. AXPO NUCLEAR ENERGY (2011). Environmental Product Declaration: Beznau Nuclear Power Plant - Update 2011, 40 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7562/epd144en_v2.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
6. , I. et DINCA, C.F. (2010). Comparative Analysis Of Coal, Natural Gas And Nuclear Fuel Life Cycles By Chains Of Electrical Energy Production. U.P.B. Sci. Bull., Series C 72(2), 221-238.
7. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].

8. BELLERIVE, N. (2009). Comparaison de la performance environnementale de la production thermique d'électricité avec et sans séquestration géologique du dioxyde de carbone. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal (Canada). M.Sc.A.
9. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
10. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
11. BURKHARDT, J.J., HEATH, G. et COHEN, E. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Trough and Tower Concentrating Solar Power Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization. Journal of Industrial Ecology, 16(SUPPL.1), S93-S109.
12. BUTNAR, I., RODRIGO, J., GASOL, C.M. et CASTELLS, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. Biomass & Bioenergy, 34(12), 1780-1788.
13. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, part VII – nucléaire].
14. ELAQUA AG (2009). Environmental Product Declaration. Au-Schönenberg Small-Scale Hydro Power Plant, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7871/epd262.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
15. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
16. FRICK, S., KALTSCHMITT, M. et SCHROEDER, G. (2010). Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. Energy, 35(5), 2281-2294.
17. FROESE, R. E., SHONNARD, D. R., MILLER, C. A., KOERS, K. P. et JOHNSON, D. M. (2010). An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes States. Biomass and Bioenergy, 34, 251–262.
18. GARRETT, P. et RØNDE, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. International Journal of Life Cycle Assessment, 1-12.
19. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. Journal of Industrial Ecology, 15(6), 908-921.
20. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au mazout].
21. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïques].
22. KABIR, M.R., ROOKE, B., DASSANAYAKE, G.D.M. et FLECK, B.A. (2012). Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation. Renewable Energy, 37(1), 133-141.
23. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO2. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(4), 448-467.

24. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 130(2) 0210121-0210127.
25. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. International Journal of Life Cycle Assessment, 14(1), 52-63.
26. PEHNT, M. et HENKEL, J. (2009). Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(1), 49-66.
27. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
28. RULE, B.M., WORTH, Z.J. et BOYLE, C.A. (2009). Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand. Environ. Sci. Technol., 43(16), 6406–6413.
29. TREMEAC, B. et MEUNIER, F. (2009). Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 2104-2110.
30. WAGNER, H.-J., BAACK, C., EICKELKAMP, T., EPE, A., LOHMANN, J. et TROY, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. Energy, 36(5), 2459-2464.
31. WHITAKER, M.B., HEATH, G.A., BURKHARDT, J.J. et TURCHI, C.S. (2013). Life Cycle Assessment of a Power Tower Concentrating Solar Plant and the Impacts of Key Design Alternatives. Environmental Science & Technology, 47(11), 5896-5903.

6.8 Fiche comparative — Oxydation photochimique (Smog)

1. ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M. et LO BRANO, V. (2008). Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(1), 200–217.
2. ARNØY, S. et MODAHL, I.S. (2013). Life Cycle Data for Hydroelectric Generation at Embretsfoss 4 (E4) Power Station. Background Data for Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Product Declaration (EPD). 39 pages. En ligne : <http://ostfoldforskning.no/uploads/dokumenter/publikasjoner/703.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
3. AXPO (2010). Environmental Product Declaration: Löntschi high head storage power plant, 26 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8611/epd332.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
4. AXPO (2011). Environmental Product Declaration: Otelfingen Kompogas Facility, 21 pages En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8789/epd176_Axpo_Otelfingen_Kompogas_Facility_2012.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
5. AXPO (2012). Environmental Product Declaration: Wildegg-Brugg run-of-river Power Plant, 21 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9037/epd205_Axpo_Wildegg_Brugg.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
6. AXPO NEW ENERGIES (2008). Environmental Product Declaration: Genesys Plant Busslingen, 24 pages En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/8319/epd263en.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
7. AXPO NUCLEAR ENERGY (2011). Environmental Product Declaration: Beznau Nuclear Power Plant - Update 2011, 40 pages. En ligne :

- http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7562/epd144en_v2.pdf [page consultée le 9 avril 2014].
8. , I. et DINCA, C.F. (2010). Comparative Analysis Of Coal, Natural Gas And Nuclear Fuel Life Cycles By Chains Of Electrical Energy Production. U.P.B. Sci. Bull., Series C 72(2), 221-238.
 9. BAUER C. (2007) Holzenergie. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - cogénération à partir de bois].
 10. BOLLIGER R. et BAUER C. (2007) Wasserkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VIII- hydroélectricité].
 11. BURGER B. et BAUER C. (2007) Windkraft. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie XIII- énergie éolienne].
 12. BUTNAR, I., RODRIGO, J., GASOL, C.M. et CASTELLS, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. *Biomass & Bioenergy*, 34(12), 1780-1788.
 13. DONES R., BAUER C. et DOKA G. (2009) Kernkraft. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII – nucléaire].
 14. ELAQUA AG (2009). Environmental Product Declaration. Au-Schönenberg Small-Scale Hydro Power Plant, 24 pages. En ligne : <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7871/epd262.pdf> [page consultée le 9 avril 2014].
 15. FAIST EMMENEGGER M., HECK T. et JUNGBLUTH N. (2007) Erdgas. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au gaz].
 16. FAIX, A., SCHWEINLE, J., SCHÖLL, S., BECKER, G. et MEIER, D. (2010). (GTI-tcbiomass) Life-cycle assessment of the BTO® process (biomass-to-oil) with combined heat and power generation. *Environmental progress & sustainable energy*, 29(2), 193-202.
 17. GARRETT, P. et RØNDE, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.
 18. GUEST, G., BRIGHT, R.M., CHERUBINI, F., MICHELSEN, O. et ANDERS HAMMER, S. (2011). Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 908-921.
 19. JESWANI, H.K., GUJBA, H. et AZAPAGIC, A. (2011). Assessing Options for Electricity Generation from Biomass on a Life Cycle Basis: Environmental and Economic Evaluation. *Waste and Biomass Valorization*, 2(1), 33-42.
 20. JUNGBLUTH N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - centrales thermiques au mazout].
 21. JUNGBLUTH N., STUCKI M. et FRISCHKNECHT R. (2009) Photovoltaics. Data v2.1 In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6 - systèmes solaires photovoltaïques].
 22. KOORNNEEF, J., VAN KEULEN, T., FAAIJ, A. et TURKENBURG, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 448-467.

23. KORONEOS, C.J., PIPERIDIS, S.A., TATATZIKIDIS, C.A. et ROVAS, D.C. (2008). Life Cycle Assessment of a Solar Thermal Concentrating System, WSEAS Conferences in Spain. September 2008 209-217
24. LECHÓN, Y., DE LA RÚA, C. et SÁEZ, R. (2008). Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 130(2) 0210121-0210127.
25. MARTÍNEZ, E., SANZ, F., PELLEGRINI, S., JIMÉNEZ, E. et BLANCO, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. International Journal of Life Cycle Assessment, 14(1), 52-63.
26. PEHNT, M. et HENKEL, J. (2009). Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(1), 49-66.
27. RÖDER A., BAUER C. et DONES R. (2007) Kohle. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. [Rapport ecoinvent no 6, partie VII- centrales thermiques au charbon].
28. ROEDL, A. (2010). Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice—a life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(6), 567-578.
29. SINGH, B., STROMMAN, A.H. et HERTWICH, E. (2011). Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(3), 457-466.
30. VATTENFALL (2011). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower, S-P-00088, 2011-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 63 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
31. VATTENFALL (2013a). Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Forsmark Nuclear Power Plant. Version 1.2 S-P 0021 2013-03-27. Vattenfall AB Nuclear Power, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9914/epd21_Vattenfall_Forsmark_Nuclear_Power_Plant_2014-03-27.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
32. VATTENFALL (2013b) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Wind Farms. S-P-00183, 2013-02-01, Vattenfall AB, Sweden, 46 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9018/epd183_Vattenfall_Nordic_Wind_2013.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
33. VATTENFALL (2013c) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Wind Farms in the UK. S-P-00515, 2013-12-31, Vattenfall AB, Sweden, 42 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/9781/epd517_Vattenfall_Wind_UK.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
34. VATTENFALL (2014) Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Rinhalts Nuclear Power Plant, version 1.2 S-P-00026, 2014-03-27, Vattenfall AB, Sweden, 52 pages. En ligne : http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf [page consultée le 26 juin 2014].
35. WAGNER, H.-J., BAACK, C., EICKELKAMP, T., EPE, A., LOHMANN, J. et TROY, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. Energy, 36(5), 2459-2464.

Annexe A : FICHES COMPARATIVES

Fiche	Comparaison des filières de production électrique	Comparaison des bouquets d'énergie électrique
<i>Base de données ICV</i>	<i>ecoinvent 2.2</i>	<i>ecoinvent 3.01</i>
<i>Méthode d'ÉICV</i>	<i>CML V3.01</i>	<i>IMPACT WORLD+</i>
Changement climatique	X	X
Destruction de la couche d'ozone	X	
Acidification	X	
Eutrophisation	X	
Toxicité humaine	X	
Oxydation photochimique (smog)	X	
Épuisement des ressources	X	X
Santé humaine		X
Qualité des écosystèmes		X

Les fiches comparant entre elles les filières électriques et les bouquets d'énergie électrique sur la base d'indicateurs environnementaux sont présentées dans les pages qui suivent. Pour cette section, la numérotation des pages est suspendue afin que les fiches puissent être autonomes.



Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date Novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Changement climatique*.

CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'indicateur *Changement climatique* (aussi appelé *Potentiel de réchauffement global*) est lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. De manière générale, l'évaluation des impacts associés aux émissions de GES est réalisée à partir de la méthode du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC en anglais). Cette méthode prend en compte le potentiel de réchauffement de chaque gaz à effet de serre, et ramène le tout en kilogramme équivalent de dioxyde de carbone (kg éq. CO₂), en se basant sur les données de forçage radiatif infrarouge. Des facteurs de caractérisation sont utilisés pour convertir les kilogrammes des différents GES en kilogramme équivalent de CO₂.

Dans le contexte comparatif de cette fiche, il est important de préciser que certains choix méthodologiques peuvent faire varier les résultats d'une étude à l'autre.

- Le GIEC met périodiquement à jour la liste des GES et leurs facteurs de caractérisation (ou potentiel de réchauffement global, PRG), en fonction des plus récentes avancées dans la science du climat (par exemple, 1 kg de méthane équivalait à 21 kg de CO₂ dans la publication de 1996 (GIEC, 1996) et correspond à 36 kg de CO₂ dans le plus récent rapport (GIEC, 2013)). Les études consultées peuvent donc avoir utilisé l'un ou l'autre des facteurs du GIEC sans préciser lequel.
- Un autre élément faisant varier les résultats touche la période sur laquelle est estimé le potentiel de réchauffement global. Un horizon de 100 ans est généralement employé, mais certaines méthodes d'évaluation des impacts utilisent un horizon de 500 ans, ce qui a pour effet de modifier les facteurs de caractérisation des différents GES par rapport au dioxyde de carbone. En effet, les gaz ayant un fort potentiel de réchauffement climatique, mais une courte durée de vie ont une contribution relative plus importante quand un horizon de temps plus court est choisi. À titre d'exemple, 1 kg de méthane (qui se dégrade en moins de dix ans dans l'atmosphère) équivaut à 25 kg de CO₂ sur un horizon de 100 ans, mais à 7,6 kg de CO₂ sur un horizon de 500 ans et à 72 kg de CO₂ si un horizon de 20 ans est considéré (facteur du GIEC 2007). Les études consultées peuvent donc avoir utilisé l'un ou l'autre des facteurs du GIEC sans préciser lequel.
- La prise en compte ou non de la transformation subséquente de certains GES en CO₂. Par exemple, le méthane (CH₄) a une durée de vie d'environ 10 ans dans l'atmosphère, période pendant laquelle la molécule agit sur le réchauffement climatique selon son PRG mentionné plus haut. Par la suite, le méthane se dégrade pour produire du CO₂ qui, à son tour, contribuera au réchauffement climatique, mais de façon moindre. La majorité des études publiées jusqu'à présent ne prennent pas en compte la transformation des GES en CO₂. Dans sa plus récente publication, le GIEC recommande cependant de l'inclure.

Cet indicateur s'applique à une échelle globale (mondiale) puisque certaines des substances émises ont une persistance dans l'atmosphère assez longue pour se distribuer partout sur la planète.

Comparaison des filières de production électrique

La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, toutes les données disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec (données spécifiques pour l'année 2012).

Pour cet indicateur, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le biogaz, la biomasse, le solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie marémotrice, houlomotrice et géothermique, de même que des sources d'énergie non-renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

Pour cet indicateur, les filières hydroélectriques à réservoir et au fil de l'eau ont été traitées séparément dû à l'importance des émissions issues des réservoirs.

La Figure 1 présente les émissions de gaz à effet de serre associées au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières de production. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. Une part de la variabilité illustrée est due aux choix méthodologiques mentionnés précédemment.

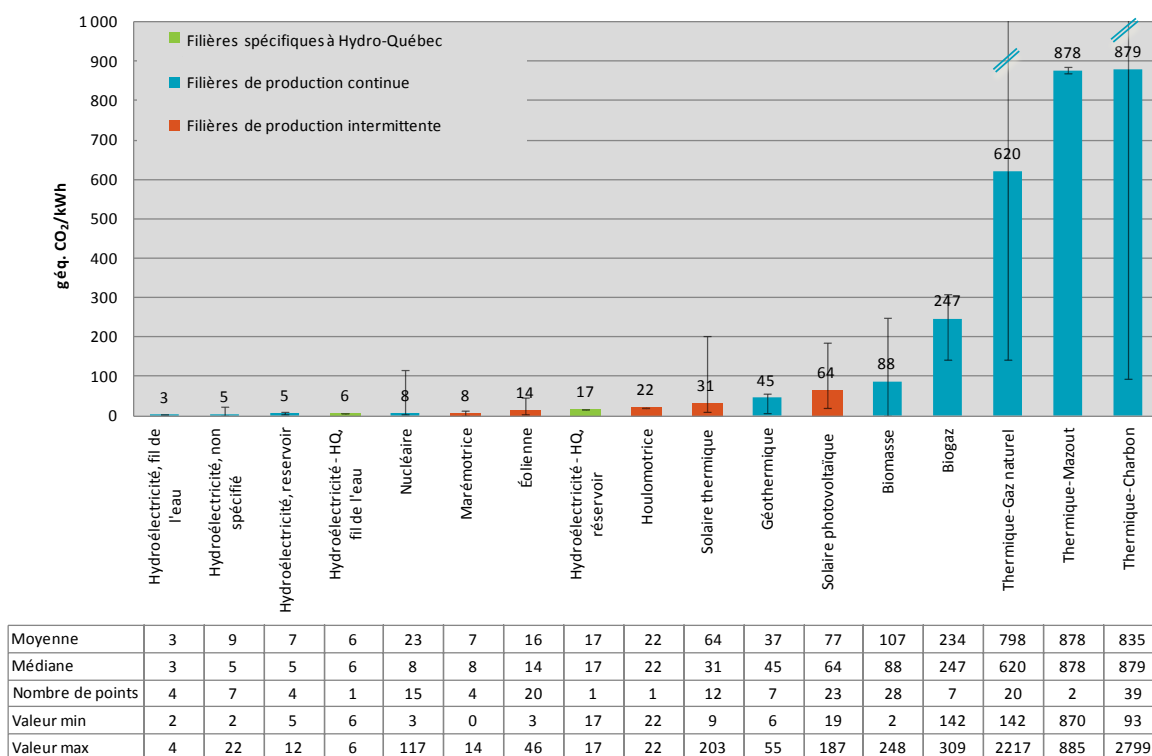


Figure 1 : Comparaison des résultats de l'indicateur Changement climatique par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.

Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

Les principales substances ayant un effet sur l'indicateur sont le CO₂ et le CH₄ qui proviennent avant tout de la combustion d'énergies fossiles telles que le charbon, le mazout et le gaz naturel, mais aussi de la combustion de produits renouvelables (biomasse et biogaz). Ces substances sont également liées aux changements d'utilisation de terre (défrichage de terres et séquestration ou perte de carbone dans le sol) et aux réservoirs des centrales hydroélectriques. Les émissions de GES des réservoirs hydroélectriques constituent donc la

principale source d'émission de cette filière (bien que ces émissions ne soient pas toujours mesurées dans les publications). En région boréale, ces émissions se produisent principalement au cours des dix premières années suivant l'enneigement des terres, après quoi les émissions diminuent au niveau des lacs naturels environnants.

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Trois groupes de filières sont identifiés : les filières qui utilisent des combustibles fossiles (charbon, mazout, gaz naturel), avec des émissions issues de la combustion; des filières renouvelables qui émettent faiblement des GES ou qui ont un plus grand impact lors de la fabrication (biogaz, solaires, géothermie), et finalement, les filières éolienne, nucléaire, et hydroélectriques, qui ont un impact très faible puisqu'elles n'émettent pratiquement pas de GES lors de la production d'électricité.
- La grande variabilité technologique des filières thermiques introduit une importante variabilité des résultats, notamment dans le cas des filières thermiques au gaz naturel et au charbon pour lesquelles certaines centrales sont dotées d'un système de capture de carbone réduisant sensiblement les émissions de CO₂. Dans le cas de la filière gaz naturel, il existe également des centrales à cycle combiné qui présentent des impacts plus faibles que les centrales classiques, principalement grâce à leur plus grande efficacité.
- Le kWh produit par les filières hydroélectriques avec et sans réservoir d'Hydro-Québec (17 et 6 g éq. CO₂/kWh respectivement) présente un indicateur *Changement climatique* légèrement plus élevé que l'hydroélectricité avec et sans réservoir retrouvée dans la littérature (5 et 3 g éq. CO₂/kWh respectivement). Cette différence s'explique par la prise en compte d'émissions supplémentaires dans le cadre de l'étude menée par Hydro-Québec, dont les émissions des réservoirs des centrales hydroélectriques lors des dix premières années suivant leur mise en eau. L'approche utilisée par Hydro-Québec est conservatrice, puisqu'elle considère les émissions brutes des réservoirs dans les dix premières années suivant leur création, tel que recommandé par le GIEC (IPCC, 2006). Il importe de souligner que les émissions de GES des réservoirs varient considérablement selon leur région géographique et la façon de comptabiliser ces émissions. De plus, l'intensité des émissions d'une centrale hydroélectrique à réservoir dépend grandement de la superficie du réservoir et de la capacité de production de la centrale qui y est associée.

Comparaison des bouquets d'énergie électrique

Le bouquet d'énergie électrique représente l'électricité disponible chez le consommateur. Au Québec, ce bouquet comprend à la fois l'électricité produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée de producteurs privés et les importations. De manière plus générale, le bouquet d'énergie électrique d'une région comprend, en proportion, l'ensemble des filières énergétiques qui ont été utilisées pour générer l'électricité distribuée au consommateur. Les activités de transport et de distribution d'électricité y sont également incluses.

La Figure 2 présente les émissions de gaz à effet de serre des bouquets d'énergie électrique de plusieurs régions (provinces canadiennes, régions américaines¹, pays), comparées à celles du bouquet du Québec en 2012. Les données environnementales utilisées sont tirées de la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent v 3.0* (www.ecoinvent.org/database/), et comparées aux données spécifiques d'Hydro-Québec pour l'année 2012.

La Figure 3 présente, quant à elle, les émissions de gaz à effet de serre des centrales situées dans les États du Nord-Est américain, ainsi que celles des centrales d'Hydro-Québec Production en 2012. Les émissions associées à la production d'électricité en dehors des frontières des États étudiés ne sont donc pas considérées dans cette figure. Dans le cas des émissions d'Hydro-Québec Production, les émissions associées à la production d'électricité au niveau des réseaux autonomes et des producteurs privés du Québec ne sont pas

¹ Les régions électriques de l'Amérique du Nord correspondent aux huit conseils régionaux de la NERC (North American Electric Reliability Corporation), et couvrent le Canada, les États-Unis et une partie du Mexique. Les bouquets d'énergie électrique employés dans la présente étude ne considèrent cependant que la portion produite aux États-Unis.

FRCC : Florida Reliability Coordinating Council; MRO : Midwest Reliability Organization; NPCC : Northeast Power Coordinating Council; RFC : Reliability First Corporation; SERC : SERC Reliability Corporation; SPP : Southwest Power Pool; TRE : Texas Reliability Entity (ou ERCOT) ; WECC : Western Electricity Coordinating Council.

prises en compte. La composition des bouquets de production des États du Nord-Est américain provient de l'U.S. Energy Information Administration, alors que celle d'Hydro-Québec Production provient d'Hydro-Québec. Les activités de transport d'électricité y sont également incluses.

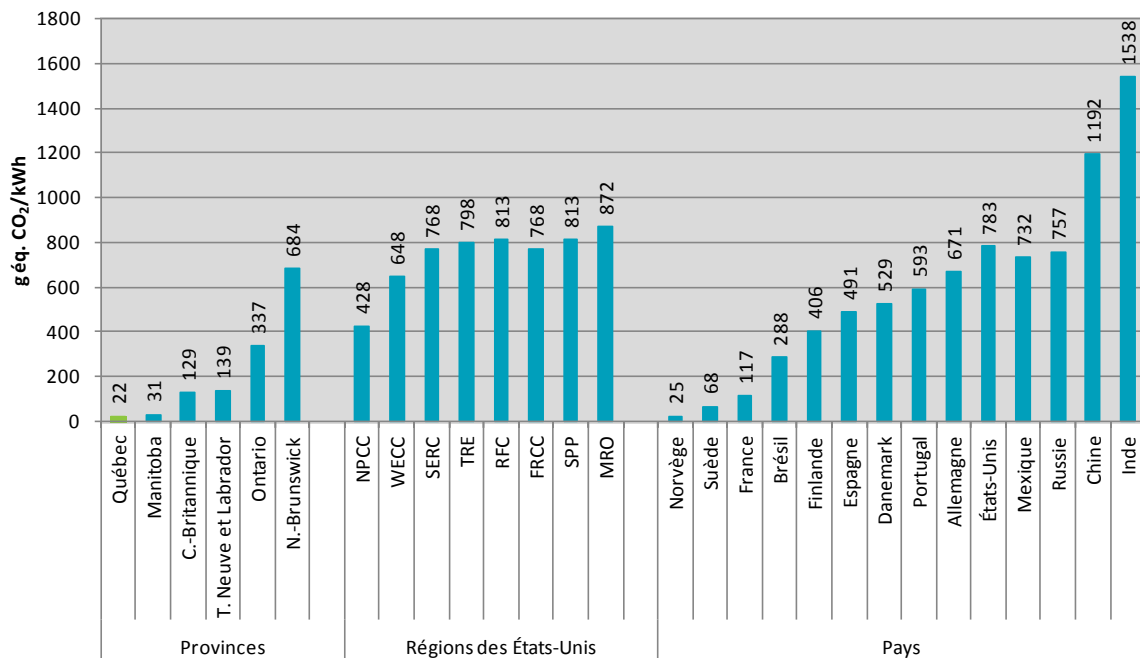


Figure 2 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Changement climatique* par kilowattheure distribué pour différentes juridictions ou régions (facteurs 2007 du GIEC, 100 ans).

Il ressort de cette comparaison que le kilowattheure distribué au Québec (2012), à 22 g éq. CO₂/kWh, se situe parmi les approvisionnements électriques ayant l'indicateur *Changement climatique* le plus faible. Il est comparable à celui d'autres régions ayant des bouquets d'énergie électrique comprenant une forte part d'hydroélectricité, comme ceux du Manitoba (31 g éq. CO₂/kWh) et de la Norvège (25 g éq. CO₂/kWh).

Les régions ayant un bouquet d'énergie électrique constitué d'une part importante d'énergies renouvelables et nucléaire viennent ensuite, comme la Suède, la Colombie-Britannique, l'Ontario, la France et le Brésil.

Enfin, les régions dont le bouquet d'énergie électrique provient en grande partie de combustibles fossiles (comme la Chine, l'Inde et la région du Midwest aux États-Unis (MRO)) présentent des impacts potentiels, en termes de *Changement climatique*, dépassant de 50 fois ceux du bouquet d'énergie électrique québécois.

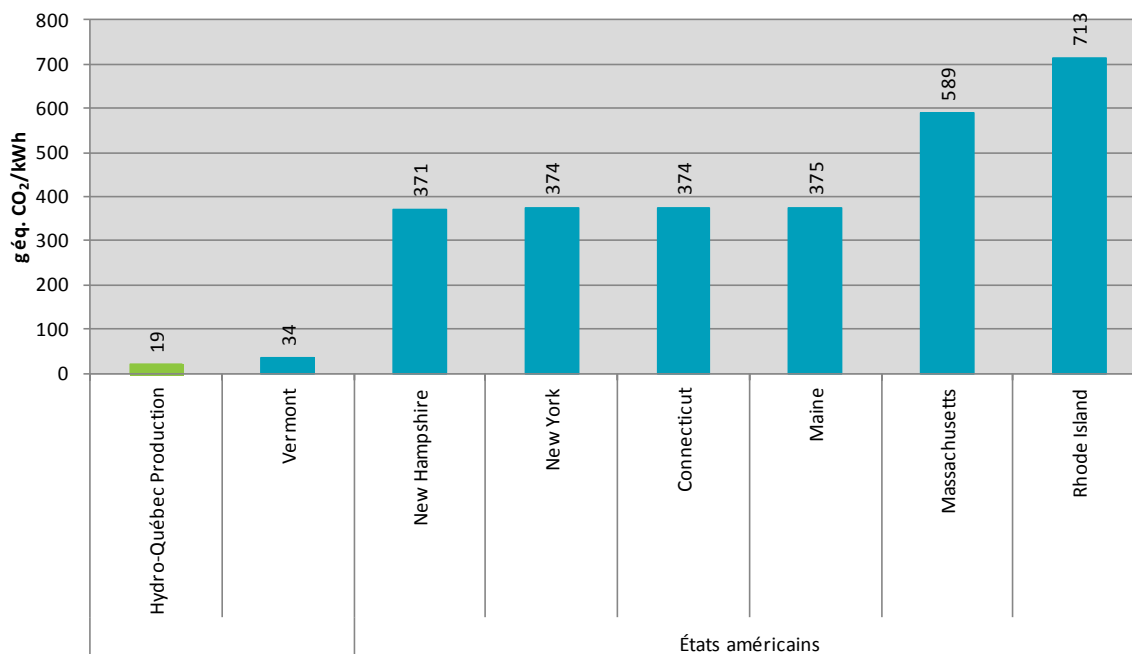


Figure 3 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Changement climatique* par kilowattheure produit dans différents États du Nord-Est américain et par Hydro-Québec Production (facteurs 2007 du GIEC, 100 ans).

Comme dans le cas du kWh distribué au Québec (Figure 2), les émissions associées au kWh produit par les centrales d'Hydro-Québec Production en 2012 (19 g éq. CO₂/kWh), se comparent avantageusement à celles des centrales de productions d'électricité des États du Nord-Est américain. L'État du Vermont, avec une forte présence d'énergie nucléaire, présente un indicateur *Changement climatique* également très faible (34 g éq. CO₂/kWh). Cet État dépend toutefois en grande partie des importations pour répondre à ces besoins en d'électricité.

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques et la composition des bouquets d'énergie électrique comparés, une présentation de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



HYDRO-QUÉBEC

COMPARAISON DES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Destruction de la couche d'ozone*.

DESTRUCTION DE LA COUCHE D'OZONE

L'indicateur *Destruction de la couche d'ozone* est lié à la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, se traduisant par l'augmentation des rayons ultraviolets (UV) qui atteignent la terre. Ceux-ci ont plusieurs incidences sur la santé humaine (tels que le développement de cataractes et les cancers de la peau) et peuvent également affecter la vie animale et les écosystèmes terrestres et aquatiques. Les substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) contiennent généralement du chlore, du fluor, du brome, du carbone et de l'hydrogène dans des proportions variables, et sont souvent regroupées sous l'appellation générique d'hydrocarbures halogénés. Les chlorofluorocarbures (CFC), le tétrachlorure de carbone et le méthyl chloroforme sont d'importants gaz anthropiques destructeurs de l'ozone, utilisés pour de nombreuses applications, notamment la réfrigération, la climatisation, le gonflement des mousses, le nettoyage des composants électroniques et comme solvants¹.

Pour quantifier cet indicateur, le modèle développé par le World Meteorological Organisation (WMO) est généralement employé. Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) y est mesuré en kilogramme équivalent de trichlorofluorométhane (kg éq. CFC-11). Des facteurs de caractérisation sont ainsi utilisés pour convertir les kilogrammes des différentes SACO en kilogramme équivalent de CFC-11.

Dans le contexte comparatif de cette fiche, il faut cependant préciser que certains choix méthodologiques peuvent contribuer à la variabilité des résultats d'une étude à l'autre.

Cet indicateur s'applique à une échelle globale (mondiale) puisque certaines des substances émises ont une persistance dans l'atmosphère assez longue pour se distribuer partout sur la planète.

Comparaison des filières de production électrique

La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, toutes les données disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v.2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux données spécifiques pour l'année 2012 relatives aux centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec.

Pour cet indicateur, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire

¹ Environnement Canada (2013). Substances appauvrissant la couche d'ozone. En ligne : <https://www.ec.gc.ca/ozone/default.asp?lang=Fr&n=D57A0006-1> [page consultée en juin 2014].

thermique et photovoltaïque, le biogaz et la biomasse, de même que des sources d'énergie non-renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

La Figure 1 présente les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone associées au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières de production. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. La grande variabilité des filières nucléaire et thermique-gaz naturel s'explique par :

- la diversité des technologies nucléaires comparées (la valeur minimale représente une technologie qui utilise de l'uranium naturel; le processus d'enrichissement est un grand émetteur de gaz à haut pouvoir d'appauvrissement de la couche d'ozone (CFC-114)).
- l'origine du gaz naturel et les distances de transport (les technologies utilisant du gaz provenant de la Russie présentent des résultats plus élevés que celles utilisant du gaz d'autres régions).

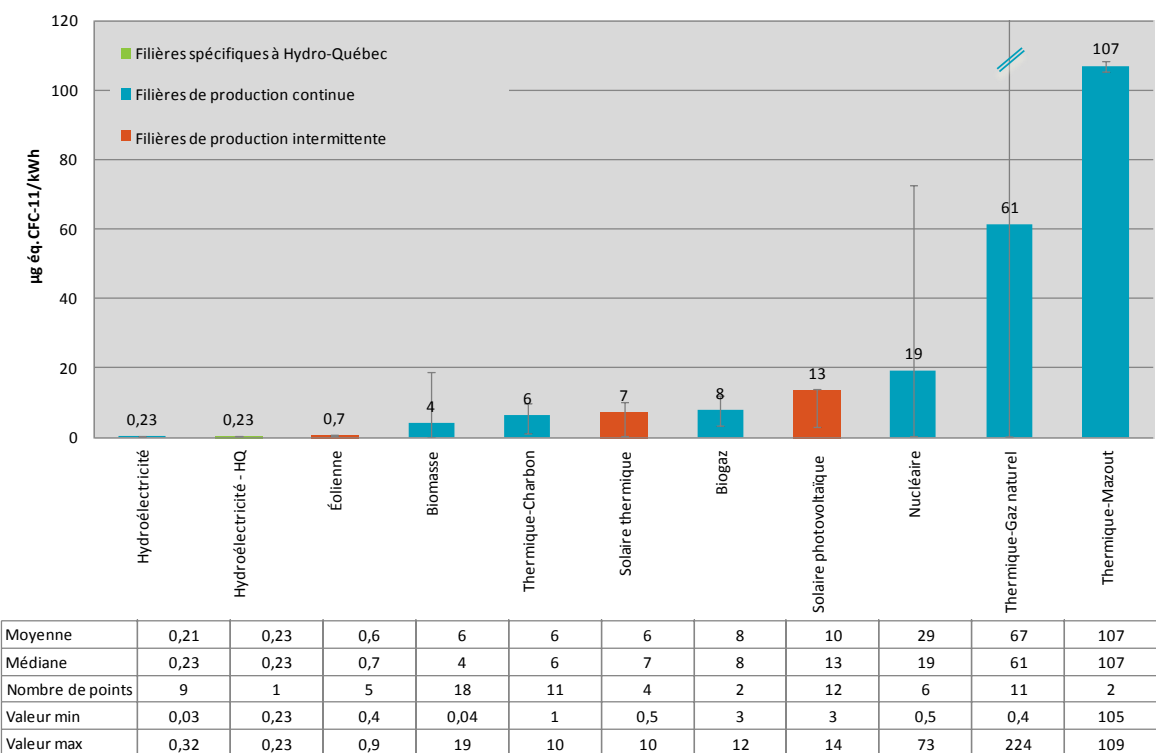


Figure 1 : Comparaison des résultats d'indicateur Destruction de la couche d'ozone par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.

Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

Les principales sources de substances appauvrissant la couche d'ozone sont liées à la production de certains combustibles fossiles, notamment le mazout, à certains processus d'enrichissement d'uranium, à la production de gaz de cokerie et au transport du gaz naturel.

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Trois groupes de filières sont identifiés : les filières nucléaire, thermique-mazout et thermique-gaz naturel avec les résultats les plus élevés, dus aux émissions lors de l'extraction, de la production et du transport des combustibles; d'autres filières (thermique-charbon, photovoltaïque, solaire thermique, biomasse et biogaz) qui présentent des impacts dix fois moindres que le groupe le plus impactant et où les émissions de SACO proviennent soit de la production des matériaux (cas des filières solaires) soit de l'utilisation de combustibles fossiles lors d'activités secondaires (cas de la biomasse et de la filière thermique-charbon). Le troisième groupe est constitué des filières hydroélectriques et éoliennes, avec des indicateurs très faibles (500 fois inférieurs à celui de la filière

au mazout), dont l'impact potentiel mesuré provient de l'utilisation de mazout et gaz naturel lors d'activités secondaires.

- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (0,23 µg éq. CFC-11 /kWh en moyenne) présente un indicateur *Destruction de la couche d'ozone* similaire à celui de l'hydroélectricité retrouvé dans la littérature (0,21 µg éq. CFC-11 /kWh en moyenne).

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (juin 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques, de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



HYDRO-QUÉBEC

COMPARAISON DES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Acidification*.

ACIDIFICATION

Les substances acidifiantes peuvent causer divers impacts aux sols, aux eaux souterraines ou de surface, aux organismes, aux écosystèmes et aux biens matériels. Le potentiel d'*acidification* d'une émission à l'air est calculé en kilogramme équivalent de dioxyde de soufre (kg éq. SO₂). Des facteurs de caractérisation sont ainsi utilisés pour convertir les kilogrammes de différentes substances acidifiantes en kilogramme équivalent de SO₂.

Cet indicateur s'applique à une échelle régionale puisque les substances qui contribuent à l'indicateur ne se déplacent qu'à une échelle continentale.

Il existe une certaine variabilité dans la manière de modéliser l'acidification des milieux terrestres et aquatiques. Certaines des méthodes d'évaluation disponibles ne considèrent que le potentiel d'acidification des substances (c.-à-d. la génération d'ions hydrogène H⁺). D'autres emploient des modèles plus évolués, permettant notamment de considérer le devenir atmosphérique des substances (modélisation de la dispersion des molécules et leur réaction dans l'air) et de leur effet dans l'environnement.

Dans la présente fiche, les résultats comparés ont été tirés de la littérature. Tous les résultats publiés ont été compilés, sans égard à la méthode utilisée pour le calcul de l'indicateur acidification, puisque cette information est rarement disponible.

Comparaison des filières de production électrique

La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, toutes les données disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux données spécifiques pour l'année 2012 relatives aux centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec.

Pour cet indicateur, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, le biogaz et la biomasse, de même que des sources d'énergie non-renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

La Figure 1 présente le potentiel d'acidification associé au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières de production. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. Une part de cette variabilité peut être associée à la mise en commun d'indicateurs d'acidification modélisés de manière très différente (tel que mentionné précédemment). Il existe également une variété technologique qui introduit une importante variabilité,

notamment dans les filières thermiques au gaz naturel et au charbon. L'écart-type de la filière biogaz est influencé par la nature de la matière première et la technologie utilisée pour générer le biogaz. De même, l'approvisionnement de gaz (naturel ou industriel provenant des fours à coke) ou le type de biomasse (bois, cultures) contribuent respectivement à la variabilité des filières de gaz naturel et de biomasse. La puissance des fournaies de biomasse modifie également de manière notable les résultats de cette filière.

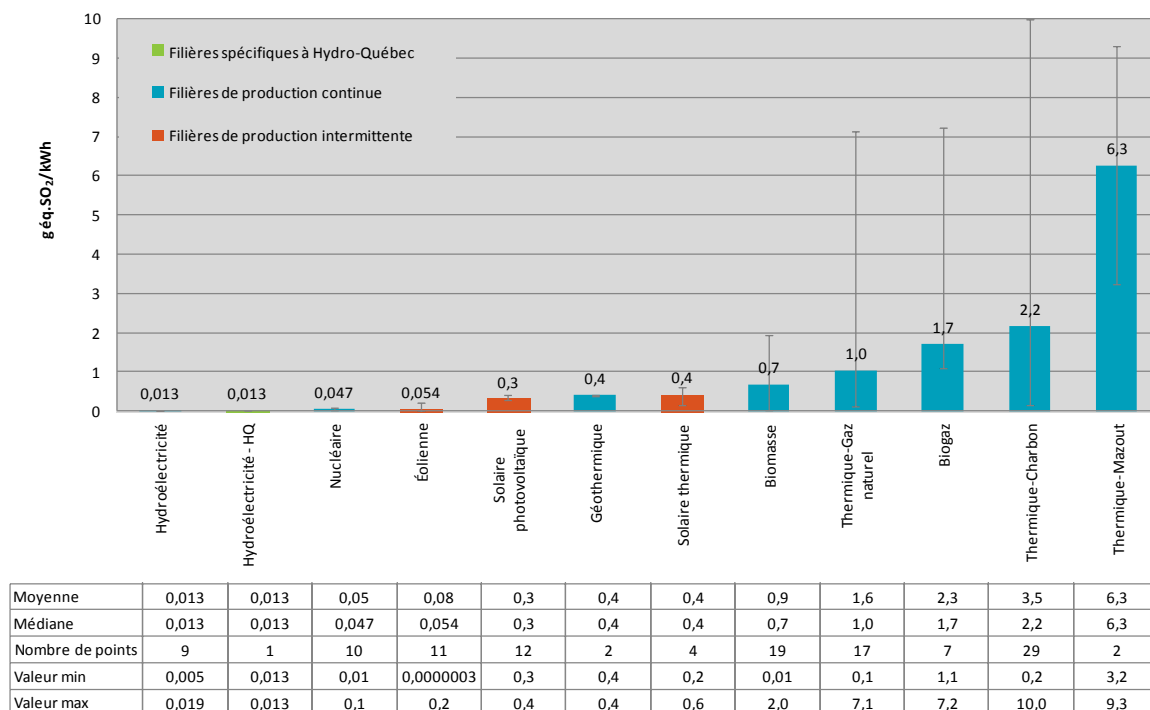


Figure 1 : Comparaison des résultats de l'indicateur Acidification par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.
 Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.
 Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

Les principales sources de substances ayant un effet acidifiant sont liées à la combustion de charbon et de mazout (émissions de dioxyde de soufre, SO₂) et à la combustion de gaz naturel et, dans une moindre mesure, de biomasse (émissions d'oxydes d'azote, NO_x).

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Quatre groupes de filières sont identifiés : le groupe des filières thermiques utilisant mazout, charbon, biogaz et gaz naturel, qui présentent les impacts potentiels les plus élevés (valeurs entre 1 et 6 g éq. SO₂/kWh) et la plus grande variabilité dans les résultats (due aux différentes technologies de traitement en cheminée ou l'origine du combustible utilisé); le groupe des filières à biomasse, qui présente des valeurs autour de 1 g éq. SO₂/kWh; un troisième groupe présentant des valeurs entre 0,1 et 0,4 g éq. SO₂/kWh, constitué des filières renouvelables (solaire, géothermique); et un groupe présentant des valeurs inférieures à 0,1 g éq. SO₂/kWh, composé des filières éolienne, nucléaire et hydroélectrique.
- Les deux derniers groupes se caractérisent par l'absence de combustion pour la production d'électricité. Tel que mentionné ci-dessus, la plupart des émissions acidifiantes y sont associées, ce qui explique les faibles impacts des filières renouvelables hydroélectrique, éolienne, solaire et géothermique, de même que celui de la filière nucléaire.
- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (0,013 g éq. SO₂/kWh en moyenne) présente un indicateur *Potentiel d'acidification* équivalent à celui de l'hydroélectricité retrouvée dans la littérature (0,013 g éq. SO₂/kWh en moyenne).
- Dans les filières à un faible score pour cet indicateur (hydroélectricité, solaires, etc.) les impacts potentiels proviennent de l'utilisation d'énergie dans les processus secondaires.

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques, de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique*, *Destruction de la couche d'ozone*, *Acidification*, *Eutrophisation*, *Toxicité humaine*, *Épuisement des ressources*, *Oxydation photochimique*, *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Eutrophisation*.

EUTROPHISATION

L'eutrophisation se définit par la modification et la dégradation d'un milieu aquatique dues à un apport excessif en substances nutritives. Bien qu'un processus d'eutrophisation très lent existe de façon naturelle, l'indicateur *Eutrophisation* fait référence aux substances ayant la capacité d'accélérer le processus de manière artificielle. Les principales substances nutritives en cause sont l'azote (provenant surtout des nitrates agricoles et des eaux usées) et le phosphore (généralement issu des phosphates dans les eaux usées), dont une augmentation des concentrations a pour effet d'entraîner une production importante d'algues et d'espèces aquatiques, conduisant à une « asphyxie » du milieu aquatique et une réduction de la biodiversité.

Le potentiel d'eutrophisation d'une émission est calculé en kilogramme équivalent de phosphate (kg éq. PO₄). Des facteurs de caractérisation sont ainsi utilisés pour convertir les kilogrammes de différentes substances eutrophisantes en kilogramme équivalent de PO₄¹.

Cet indicateur s'applique à une échelle régionale ou locale puisque les substances qui contribuent à l'indicateur ne se déplacent qu'à une échelle continentale.

Comparaison des filières de production électrique

La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, toutes les données disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux données spécifiques pour l'année 2012 relatives aux centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec.

Pour cet indicateur, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la géothermie, le biogaz et la biomasse, de même que des sources d'énergie non renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

La Figure 1 présente l'indicateur *Eutrophisation* associé au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. La grande variabilité des filières thermiques au charbon, au gaz naturel et au

¹ La méthode CML 2001 (Leiden Université, « CML-IA Characterisation Factors ». En ligne : <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html#downloads>), très largement utilisée par les études publiées, ne prend pas en compte le devenir des substances eutrophisantes (modélisation de la dispersion des molécules et leurs réactions dans l'environnement) ni leur effet (niveau d'exposition des milieux récepteurs).

biogaz est attribuable à des différences entre les technologies modélisées et au type de combustible utilisé (charbon lignite ou anthracite, notamment).

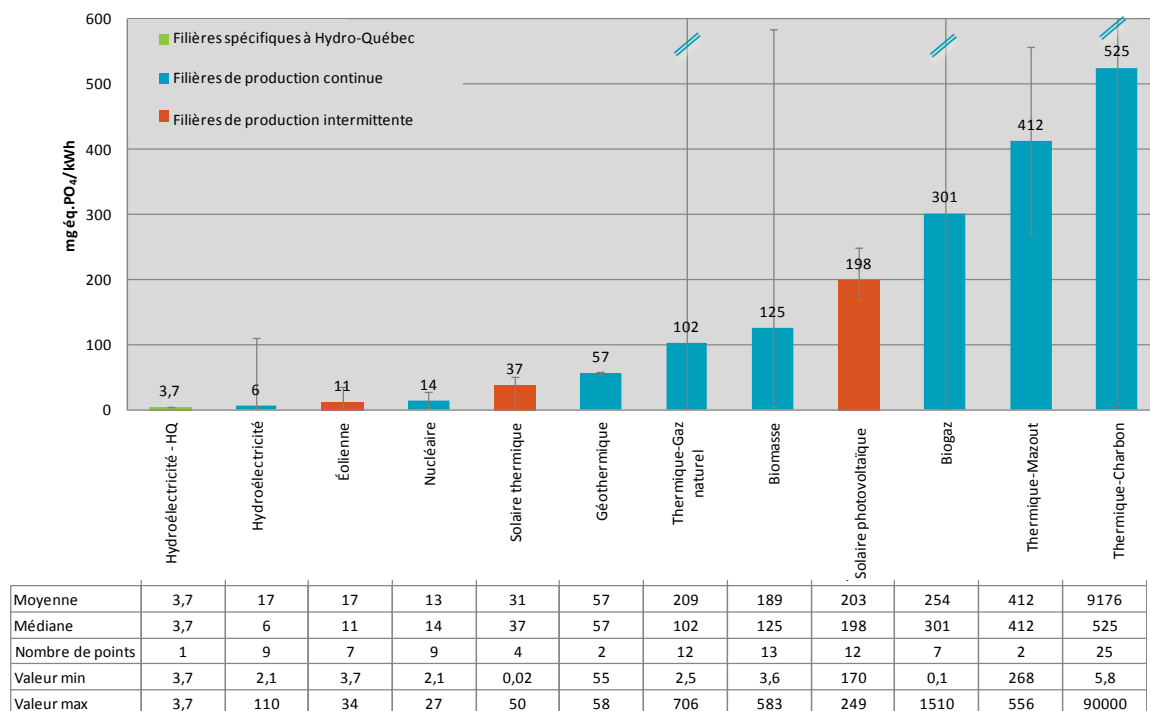


Figure 1 : Comparaison des résultats de l'indicateur Eutrophisation par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.

Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

Les principales sources de substances ayant un effet eutrophisant sont les émissions de substances phosphatées et azotées. Dans la production d'électricité, les phosphates sont surtout émis lors de l'extraction du charbon, alors que les substances azotées sont liées à la combustion de gaz naturel et, dans une moindre mesure, de la biomasse (émissions de NO_x).

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Les filières de combustion (charbon, mazout, biogaz, biomasse et gaz naturel) et le solaire photovoltaïque présentent les valeurs les plus élevées dues aux émissions de substances azotées lors de la production de combustibles, de la combustion et de la fabrication des matériaux constituant les panneaux photovoltaïques. Ensuite, la plupart des filières renouvelables (géothermique, solaire thermique, éolienne et hydroélectricité) et la filière nucléaire présentent les valeurs les plus faibles, puisque les substances eutrophisantes n'apparaissent que de façon marginale dans des processus secondaires.
- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (3,7 mg éq. PO_4 /kWh en moyenne) présente un indicateur Eutrophisation dix fois plus faible que l'hydroélectricité retrouvée dans la littérature (17 mg éq. PO_4 /kWh en moyenne). La différence provient de la prise en compte, dans certaines études publiées, de la matière organique dégradée lors du remplissage du réservoir, qui augmente de manière notable la valeur de cet indicateur. Les valeurs médianes montrent des valeurs similaires pour la filière hydroélectrique d'Hydro-Québec et celle retrouvée dans la littérature (3,7 et 6 mg éq. PO_4 /kWh respectivement).

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques, de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Toxicité humaine*.

TOXICITÉ HUMAINE

L'indicateur *Toxicité humaine* concerne les substances ayant des effets toxiques sur l'environnement humain. Les risques associés à l'exposition en milieu de travail ne sont pas inclus dans les effets modélisés.

Le potentiel de *Toxicité humaine* d'une émission est calculé en kilogramme équivalent de 1,4-dichlorobenzène (kg éq. 1,4-DB). Des facteurs de caractérisation sont ainsi utilisés pour convertir les kilogrammes de différentes substances toxiques en kilogramme équivalent de 1,4-DB.

Cet indicateur s'applique à une échelle variant de locale à globale, selon le devenir de chaque substance. En effet, les substances peu persistantes ne se déplacent que sur des courtes distances et leur effet est plus local, tandis que d'autres plus persistantes peuvent se déplacer à l'échelle globale.

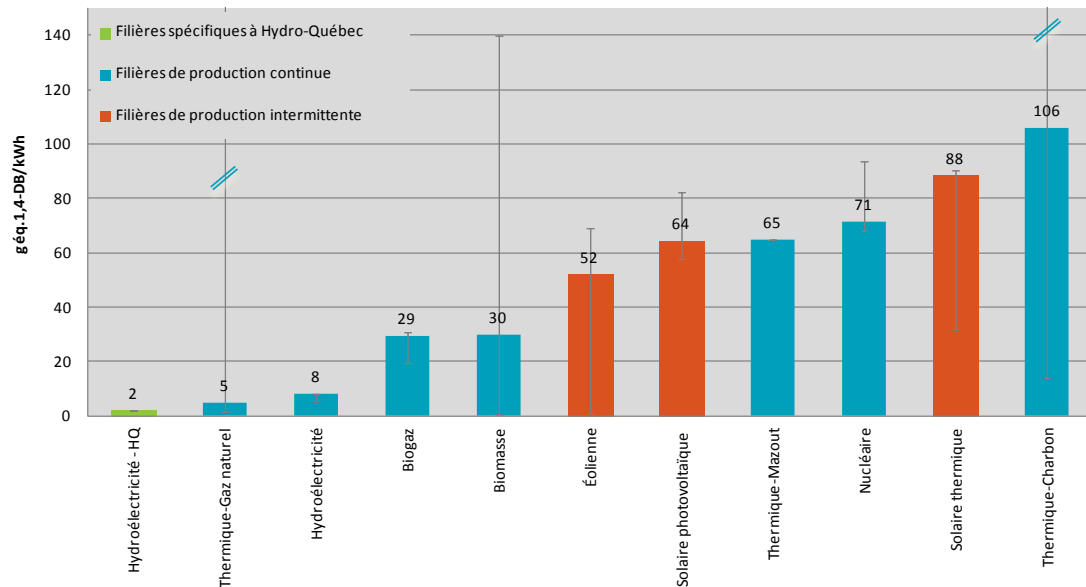
Comparaison des filières de production électrique

La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, toutes les données disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux données spécifiques pour l'année 2012 des centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec.

Pour cet indicateur, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, le biogaz et la biomasse, de même que des sources d'énergie non-renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

La Figure 1 présente l'indicateur *Toxicité humaine* associé au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières de production. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. La grande variabilité des filières thermiques au gaz naturel et au charbon est attribuable à des différences entre les technologies modélisées, au type et à la provenance des combustibles utilisés.



Moyenne	2	90	7	26	44	38	65	65	78	70	213
Médiane	2	5	8	29	30	52	64	65	71	88	106
Nombre de points	1	11	3	5	17	5	12	1	5	3	17
Valeur min	2	1	5	19	1	1	58	65	68	32	14
Valeur max	2	309	8	31	140	69	82	65	94	90	942

Figure 1 : Comparaison des résultats de l'indicateur Toxicité humaine par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.

Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

Les principales substances ayant un effet toxique sur les humains sont des composés tels que le benzène et les métaux. Le benzène est associé à certaines activités de production (gaz naturel) tandis que les métaux sont liés à l'extraction de combustibles et d'autres matériaux (charbon, uranium, fer, cuivre, etc.) et à leur utilisation.

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Trois groupes de filières sont identifiés : la filière thermique au charbon, qui présente le potentiel de toxicité humaine le plus élevés (valeur médiane supérieure à 100 g éq. 1,4-DB /kWh) et la plus grande variabilité dans les résultats. Un deuxième groupe des filières présentant des résultats entre 25 et 100 g éq. 1,4-DB /kWh inclut les centrales thermiques au mazout, le nucléaire, les filières solaires, éolienne et celles utilisant la biomasse et le biogaz. Le troisième groupe est formé par les centrales hydroélectriques et les centrales thermiques au gaz naturel et présente des valeurs moyennes très faibles (moins de 10 g éq. 1,4-DB /kWh), bien que la filière thermique au gaz naturel présente une très grande variabilité.
- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (2 g éq. 1,4-DB /kWh en moyenne) présente un indicateur *Potentiel de toxicité humaine* dans le même ordre de grandeur que celui de l'hydroélectricité retrouvée dans la littérature (7 g éq. 1,4-DB /kWh en moyenne).

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques, de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Oxydation photochimique*.

OXYDATION PHOTOCHEMIQUE (SMOG)

L'oxydation photochimique, aussi appelée « smog d'été »¹, est liée à la formation de substances réactives (principalement l'ozone) qui sont néfastes pour la santé humaine, les écosystèmes et les cultures. Le potentiel de création d'ozone photochimique d'une substance émise dans l'air est exprimé en kilogramme équivalent d'éthylène (kg éq. C₂H₄). Des facteurs de caractérisation sont ainsi utilisés pour convertir les kilogrammes de différentes substances en kilogramme équivalent de C₂H₄.

Cet indicateur s'applique à une échelle variant de locale à globale, selon le devenir de chaque substance. En effet, les substances peu persistantes ne se déplacent que sur de courtes distances et leur effet est plus local, tandis que d'autres plus persistantes peuvent se déplacer à l'échelle globale.

Comparaison des filières de production électrique

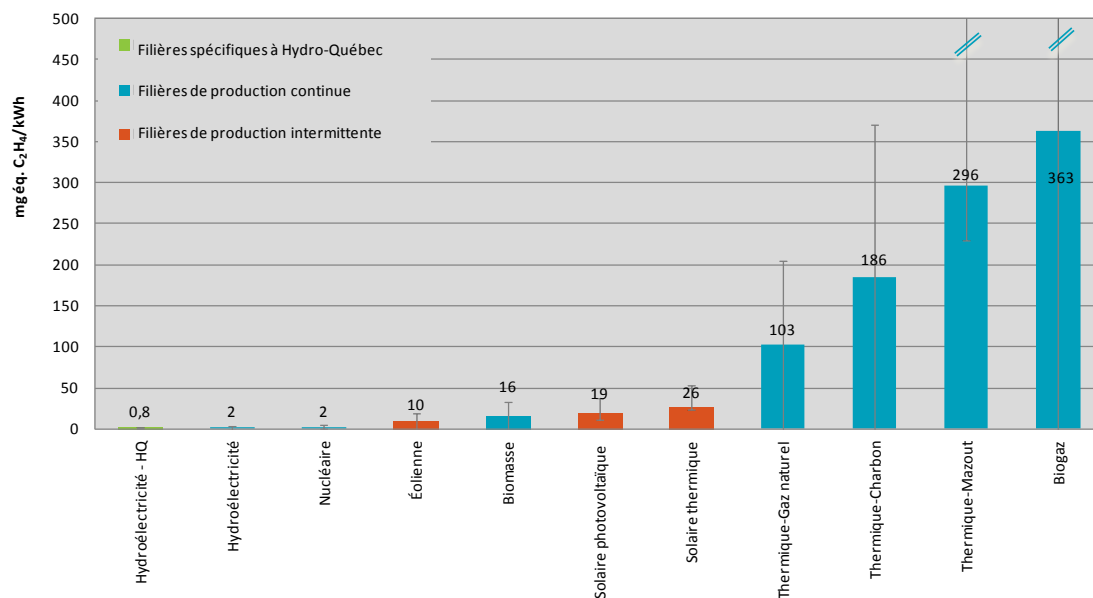
La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, toutes les données disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux données spécifiques pour l'année 2012 des centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec.

Pour cet indicateur, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, le biogaz et la biomasse, de même que des sources d'énergie non-renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

La Figure 1 présente l'indicateur *Oxydation photochimique* associé au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. La grande variabilité des filières thermiques au gaz naturel, au mazout et au charbon et de la filière au biogaz est attribuable à des différences entre les technologies modélisées et à la nature des combustibles utilisés.

¹ Le smog d'hiver n'est pas pris en compte par cet indicateur.



Moyenne	0,8	2	3	15	30	20	18	220	2261	296	368
Médiane	0,8	2	2	10	16	19	26	103	186	296	363
Nombre de points	1	9	9	8	19	12	3	12	23	2	7
Valeur min	0,8	0,8	2	2	1	17	0,3	31	0,1	230	0,3
Valeur max	0,8	5	4	56	85	27	28	851	24000	362	2380

Figure 1 : Comparaison des résultats de l'indicateur Oxydation photochimique (smog) par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.
Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

Les principales substances ayant un effet d'oxydation photochimique sont le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO) et le méthane (CH₄). Dans les différentes filières de production d'électricité, le SO₂ et le CO sont surtout émis lors de la combustion. En ce qui a trait au méthane, l'extraction et le transport du gaz naturel constituent une source majeure d'émission.

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Trois grands groupes de filières sont identifiés : un premier, qui présente les valeurs les plus élevées, est composé par des filières basées sur la combustion (charbon, mazout, gaz naturel et biogaz). Viennent ensuite, les filières biomasse, solaires et éolienne, qui présentent des valeurs dix fois plus faibles, et dont les impacts proviennent de la consommation d'énergie des activités secondaires. Finalement, le troisième groupe, composé de l'hydroélectricité et du nucléaire, présente des valeurs cent fois plus faibles que le premier groupe.
- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (0,8 mg eq. C₂H₄/kWh en moyenne) présente une valeur deux fois plus faible que celle de l'hydroélectricité retrouvée dans la littérature (2 mg eq. C₂H₄/kWh en moyenne). Cet écart est dû à la différence d'émissions de méthane entre le cycle de vie de la filière d'Hydro-Québec et ceux répertoriés dans la littérature.

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques, de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite des indicateurs d'*Épuisement des ressources*.

ÉPUISEMENT DES RESSOURCES

L'épuisement des ressources non renouvelables représente un enjeu majeur lié à la production d'électricité dans le monde.

Cette fiche regroupe deux sous-indicateurs environnementaux qui concernent l'épuisement des ressources : le premier concerne l'*Extraction des ressources minérales* de la croûte terrestre (métaux, minerais etc.) et le second l'*Utilisation d'énergies fossiles* (pétrole, gaz naturel, charbon). Contrairement aux autres indicateurs environnementaux, qui sont liés aux émissions de substances dans l'environnement, les indicateurs d'épuisement des ressources sont associés aux matières consommées tout au long du cycle de vie des filières de production électrique.

Les sections qui suivent décrivent de manière détaillée les méthodes d'évaluation des impacts utilisées pour réaliser la comparaison des filières de production électriques et des bouquets d'énergie électrique. Il est à noter que la méthode d'évaluation des impacts utilisée pour comparer les filières de production électrique (méthode CML) utilise des unités de mesure différentes de la méthode utilisée pour comparer les bouquets d'énergie électrique (méthode IMPACT World+).

Ces indicateurs s'appliquent à une échelle globale (mondiale) puisque l'épuisement des ressources a des conséquences sur toute la planète, peu importe la localisation géographique.

Comparaison des filières de production électrique

La comparaison des filières présentée dans la présente fiche ne concerne que la production électrique en elle-même et exclut tout ce qui a trait au transport et à la distribution de l'électricité.

Afin de réaliser cette analyse comparative, les données récentes disponibles de la littérature, de déclarations environnementales de produits et de la base de données *ecoinvent* v2.2 (www.ecoinvent.org/database/) ont été compilées et comparées aux données spécifiques pour l'année 2012 des centrales hydroélectriques d'Hydro-Québec. Seules les publications ayant employé la méthode CML dans sa plus récente version ont été considérées pour la comparaison graphique de l'extraction des ressources minérales. En effet, les publications utilisant les premières versions de la méthode CML ont été exclues puis qu'elle regroupe les deux sous-indicateurs dans un indicateur unique, appelé *Extraction des ressources*, rendant les résultats incomparables. De plus, la méthode IMPACT 2002+, pour laquelle il existe également quelques données publiées, quantifie l'extraction minérale en mégajoules (MJ) d'énergie supplémentaire requise pour extraire une quantité additionnelle de minerai, rendant les résultats incompatibles avec ceux de la méthode CML.

L'indicateur **Extraction des ressources minérales**¹ est mesuré en kilogramme équivalent d'antimoine (kg éq. Sb) par kilogramme extrait, afin de tenir compte des réserves existantes, du taux d'extraction et de l'« épuisement » de chaque substance minérale. L'indicateur **Utilisation d'énergies fossiles** (correspondant à la consommation d'énergie non renouvelable) est mesuré à l'aide du contenu énergétique des ressources extraites. La capacité calorifique de chaque carburant fossile est exprimée en mégajoules (MJ) par unité de volume ou de masse².

Pour ces indicateurs, les filières de production d'électricité pour lesquelles des données environnementales ont été recensées comptent des sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la géothermie, la marémotrice, le biogaz et la biomasse, de même que des sources d'énergie non-renouvelables telles que le nucléaire, le charbon, le mazout et le gaz naturel.

La Figure 1 présente l'**Extraction des ressources minérales** et la Figure 2 présente l'**Utilisation d'énergies fossiles** associées au cycle de vie d'un kilowattheure d'électricité généré par les différentes filières de production. Les valeurs médianes et les écarts-types illustrés représentent la variabilité calculée à partir des études consultées. Une part de cette variabilité peut être associée à la mise en commun d'indicateurs considérant des capacités calorifiques différentes pour chacun des carburants utilisés (tel que mentionné précédemment).

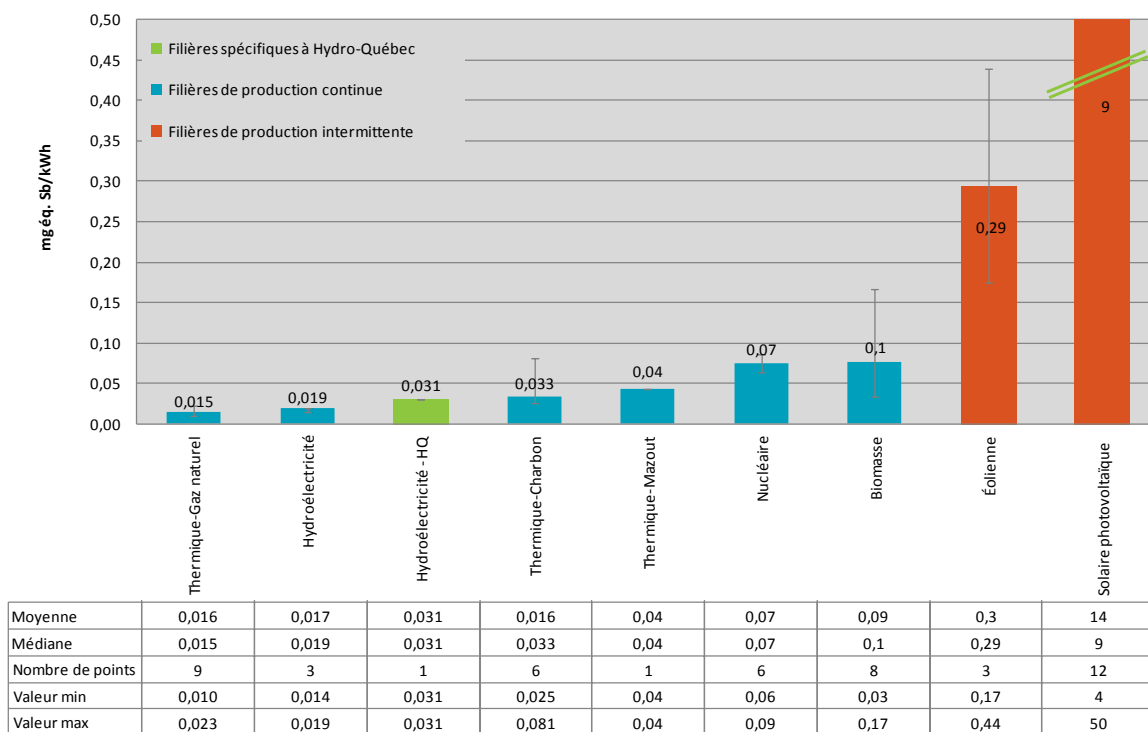


Figure 1 : Comparaison des résultats d'indicateur *Extraction des ressources minérales* par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.

Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

¹ Appelé « épuisement des ressources abiotiques » par la méthode CML (Leiden Universiteit, « CML-IA Characterisation Factors ». En ligne : <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html#downloads>).

² Selon la méthode d'évaluation choisie, la capacité calorifique inférieure ou supérieure est utilisée.

La principale source d'épuisement de ressources minérales est l'extraction de métaux, notamment le cuivre, le chrome et le fer. L'utilisation de métaux dans des processus secondaires de la construction des centrales et de leurs infrastructures représente donc le principal facteur affectant cet indicateur dans le cycle de vie de la production d'électricité. L'extraction d'uranium est aussi incluse dans cet indicateur.

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Trois groupes de filières sont identifiés : le premier inclut la filière solaire photovoltaïque, avec une valeur médiane de 9 mg éq. Sb/kWh. Le deuxième groupe inclut l'éolienne, avec des valeurs médianes trente fois moindre (0,29 mg éq. Sb/kWh). Le troisième inclut le reste de filières et présente des valeurs médianes au moins cent fois plus faibles que le premier groupe;
- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (0,03 mg éq. Sb/kWh) présente un indicateur *Extraction des ressources minérales* similaire à celui de la littérature (0,02 mg éq. Sb/kWh).

La variabilité importante des résultats de certaines filières est due à la diversité des matériaux et matières entrants considérés lors de la modélisation.

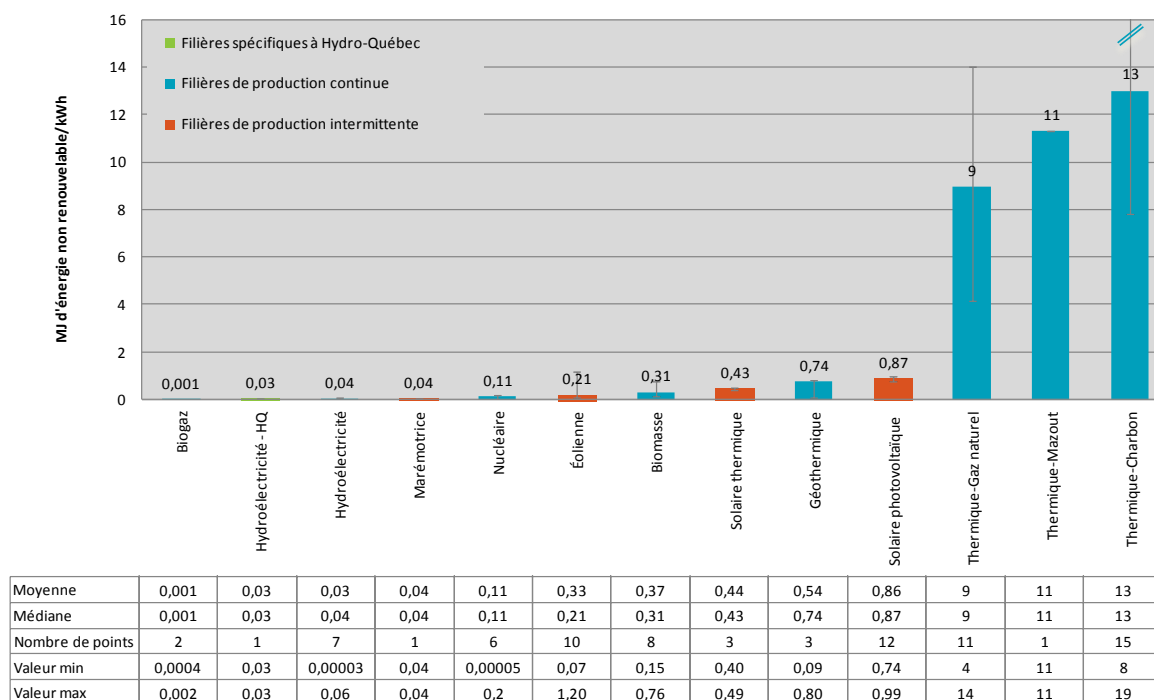


Figure 2 : Comparaison des résultats d'indicateur *Utilisation d'énergies fossiles* par kilowattheure généré avec différentes filières de production électrique.

Les histogrammes représentent les valeurs médianes des résultats répertoriés.

Le nombre de points correspond au nombre d'observations par filière.

La Figure 2 montre que l'indicateur *Utilisation d'énergies fossiles* est directement influencé par l'extraction des combustibles (charbon, pétrole, gaz naturel). Il est à noter que l'extraction d'uranium n'est pas incluse dans cet indicateur mais dans l'indicateur *Extraction des ressources minérales*. Les filières utilisant des combustibles fossiles présentent donc les indicateurs les plus élevés, à l'exception de la filière nucléaire.

Plusieurs éléments peuvent être observés :

- Trois groupes de filières sont identifiés : le premier inclut les filières qui utilisent des combustibles fossiles autres que le nucléaire (charbon, mazout et gaz naturel). Le second comprend les filières solaires, la biomasse, la géothermie et l'éolienne et présente des valeurs dix fois plus faibles que le premier groupe. Le troisième groupe, dont les valeurs sont cent fois inférieures à celle du premier groupe, inclut les filières hydroélectrique, nucléaire, marémotrice et le biogaz.

- Le kWh produit par les filières hydroélectriques d'Hydro-Québec (0,03 MJ d'énergie non renouvelable/kWh) présente un indicateur *Utilisation des énergies fossiles* similaire à celui retrouvé dans la littérature (0,03 MJ d'énergie non renouvelable/kWh).
- Il est à noter que le modèle d'évaluation d'impacts utilisé peut faire varier fortement les résultats pour cette catégorie. Notamment, la méthode IMPACT World+ incluant l'extraction d'uranium dans l'utilisation d'énergies fossiles, il en résulte une plus grande contribution de la filière nucléaire dans la Figure 4. On y observe que parmi les bouquets d'énergie électrique évalués avec la méthode IMPACT World+, ceux avec une forte présence de la filière nucléaire présentent des valeurs plus élevées.

Comparaison des bouquets d'énergie électrique

Le bouquet d'énergie électrique représente l'électricité disponible chez le consommateur. Au Québec, ce bouquet comprend à la fois l'électricité produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée auprès de producteurs privés et les importations. De manière plus générale, le bouquet d'énergie électrique d'une région comprend, en proportion, l'ensemble des filières qui ont été utilisées pour générer l'électricité distribuée au consommateur. Les activités de transport et de distribution d'électricité y sont également incluses.

Pour comparer les bouquets électriques entre eux sur le plan de la consommation des ressources, la plus récente méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie, IMPACT World+ (www.impactworldplus.org), a été employée. Tout comme pour la comparaison des filières de production électrique, deux indicateurs correspondant à l'extraction des ressources minérales et à l'utilisation d'énergie fossile ont été retenus.

La Figure 3 présente l'*Extraction des ressources minérales* et la Figure 4 présente l'*Utilisation d'énergies fossiles* des bouquets électriques de plusieurs régions (provinces canadiennes, régions américaines³, pays), comparés à celui du Québec. Les données environnementales utilisées sont tirées de la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent* v 3.0 (www.ecoinvent.org/database/), incluant les données spécifiques d'Hydro-Québec pour l'année 2012.

³ Les régions électriques de l'Amérique du Nord sont au nombre de huit et couvrent le Canada, les États-Unis et le Mexique. Les bouquets électriques employés dans la présente étude ne considèrent cependant que la portion produite aux États-Unis.
 FRCC : Florida Reliability Coordinating Council; MRO : Midwest Reliability Organization; NPCC : Northeast Power Coordinating Council; RFC : Reliability First Corporation; SERC : SERC Reliability Corporation; SPP : Southwest Power Pool; TRE : Texas Reliability Entity (ou ERCOT) ; WECC : Western Electricity Coordinating Council.

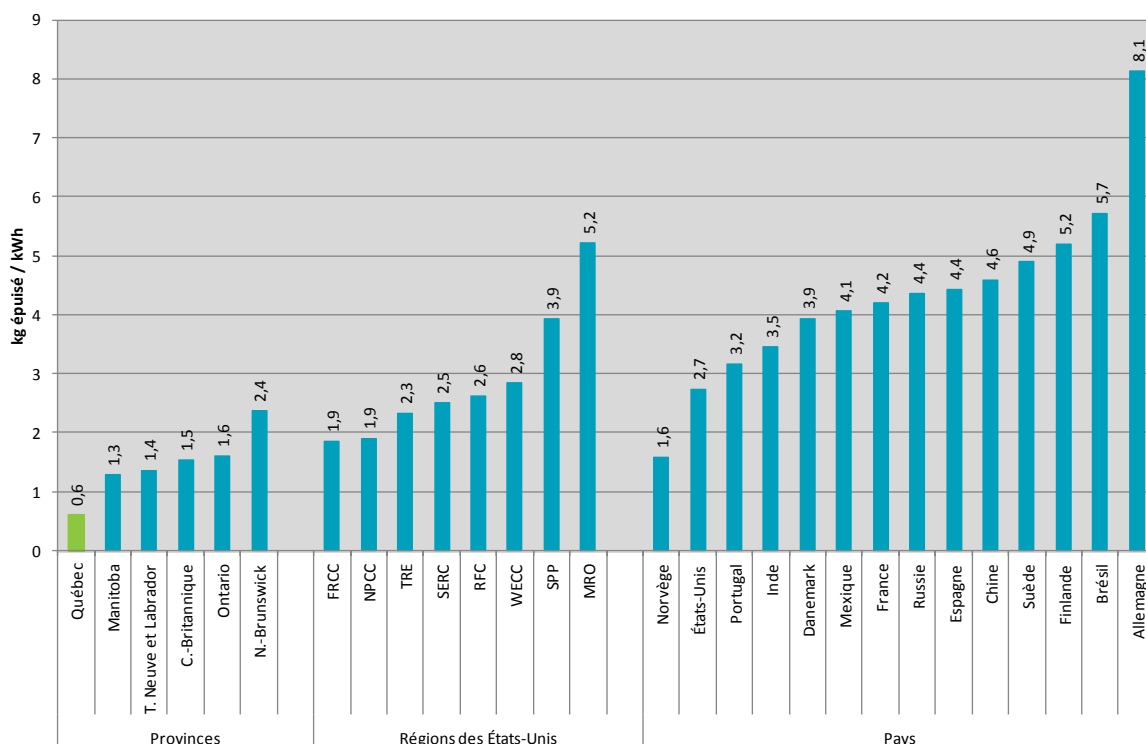


Figure 3 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Extraction de ressources minérales* par kilowattheure distribué pour différentes juridictions ou régions (méthode IMPACT World+).

Il ressort de cette comparaison que le kilowattheure distribué au Québec, à 0,6 kg épuisé/kWh, se situe parmi les approvisionnements électriques ayant l'indicateur *Extraction de ressources minérales* le plus faible.

Bien que cet indicateur provienne d'une méthode d'impact différente de celle étudiée dans le cas des filières, l'indicateur est aussi fortement influencé par l'extraction des métaux utilisés dans les activités secondaires des systèmes lors de la construction des centrales et des infrastructures. Il est à noter, que contrairement à la comparaison des filières de production, l'uranium n'est pas considéré dans cet indicateur mais dans celui de l'*Utilisation d'énergies fossiles* (Figure 4). Le principal contributeur à cet indicateur est la production d'électricité à partir de gaz de haut fourneau, filière à laquelle on attribue à la production d'électricité une partie du fer extrait lors de la production d'acier. De ce fait, les bouquets incluant une production électrique à partir de cette filière présentent des valeurs plus élevées pour l'indicateur *Extraction des ressources minérales*. L'Allemagne, où l'électricité provenant de gaz de haut fourneau ne représente que 1 % de sa production totale, est la région ayant la valeur la plus élevée.

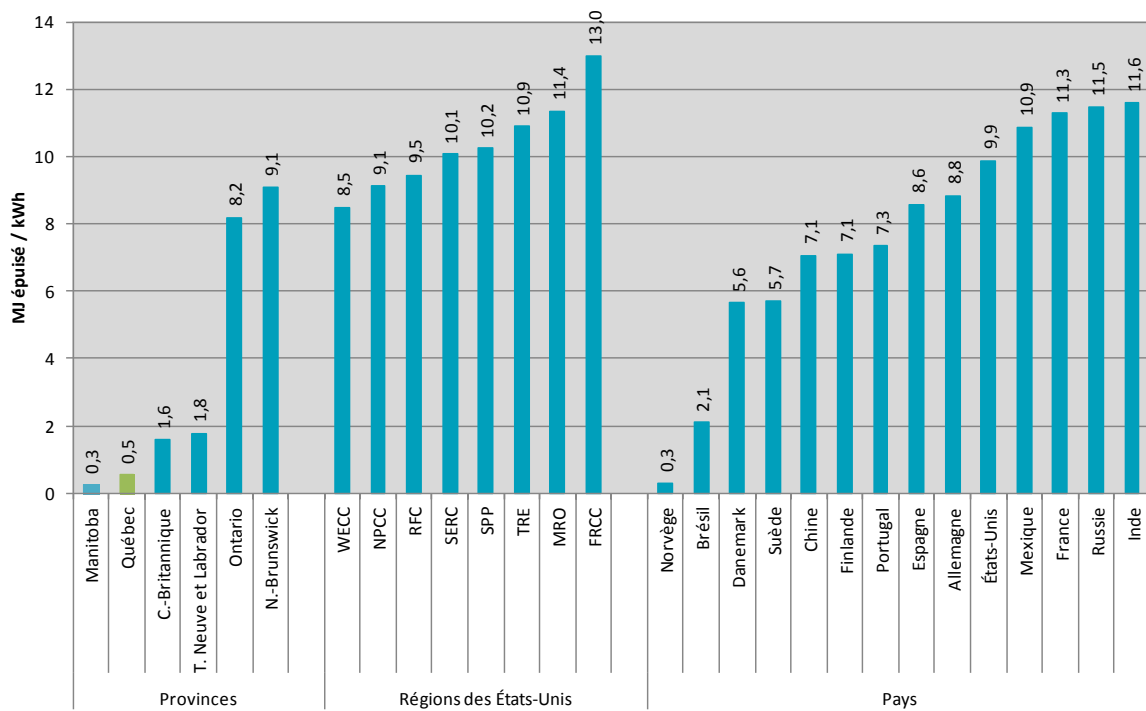


Figure 4 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Utilisation d'énergies fossiles* par kilowattheure distribué pour différentes juridictions ou régions (méthode IMPACT World+).

Bien que cet indicateur provienne d'une méthode d'impact différente de celle étudiée dans le cas des filières de production, et exprimé en une unité différente, il évalue aussi la consommation d'énergies fossiles. Cependant, à la différence de l'indicateur de la méthode CML, cet indicateur inclut l'uranium parmi les énergies fossiles.

Il ressort de cette comparaison que le kilowattheure distribué au Québec, à 0,5 MJ épaisé/kWh, se situe parmi les approvisionnements électriques ayant l'indicateur *Utilisation d'énergies fossiles* le plus faible. Il se compare aux autres régions ayant des bouquets d'énergie électrique comprenant une forte part d'hydroélectricité, comme ceux du Manitoba (à 0,3 MJ épaisé/kWh) et de la Norvège (à 0,3 MJ kg épaisé /kWh), mais la présence de la centrale nucléaire Gentilly-2 fait en sorte que le score du Québec est légèrement plus élevé. Les régions ayant un bouquet d'énergie électrique constitué d'une part importante d'énergies renouvelables, comme la Colombie-Britannique, Terre-Neuve et Labrador et le Brésil présentent un faible score pour cet indicateur.

À l'inverse, les régions avec une forte contribution des combustibles fossiles (dont la Chine, l'Inde, et la région du Midwest aux États-Unis (MRO)) ou du nucléaire (France, Ontario) ou des deux (FRCC, Nouveau Brunswick) présentent des impacts 20 fois plus élevés que le mélange énergétique québécois.

Les Figures 5 et 6 présentent, quant à elles, les impacts en termes d'*Extraction des ressources minérales* et d'*Utilisation d'énergies fossiles* des centrales situées dans les États du Nord-Est américain, ainsi que celles des centrales d'Hydro-Québec Production en 2012. L'épuisement des ressources associé à la production d'électricité en dehors des frontières des États étudiés n'est donc pas considéré dans ces figures. Dans le cas des émissions d'Hydro-Québec Production, l'épuisement des ressources associé à la production d'électricité au niveau des réseaux autonomes et des producteurs privés du Québec n'est pas pris en compte. La composition des bouquets de production des États du Nord-Est américain provient de l'U.S. Energy Information Administration, alors que celui d'Hydro-Québec Production provient d'Hydro-Québec. Les activités de transport d'électricité y sont également incluses.

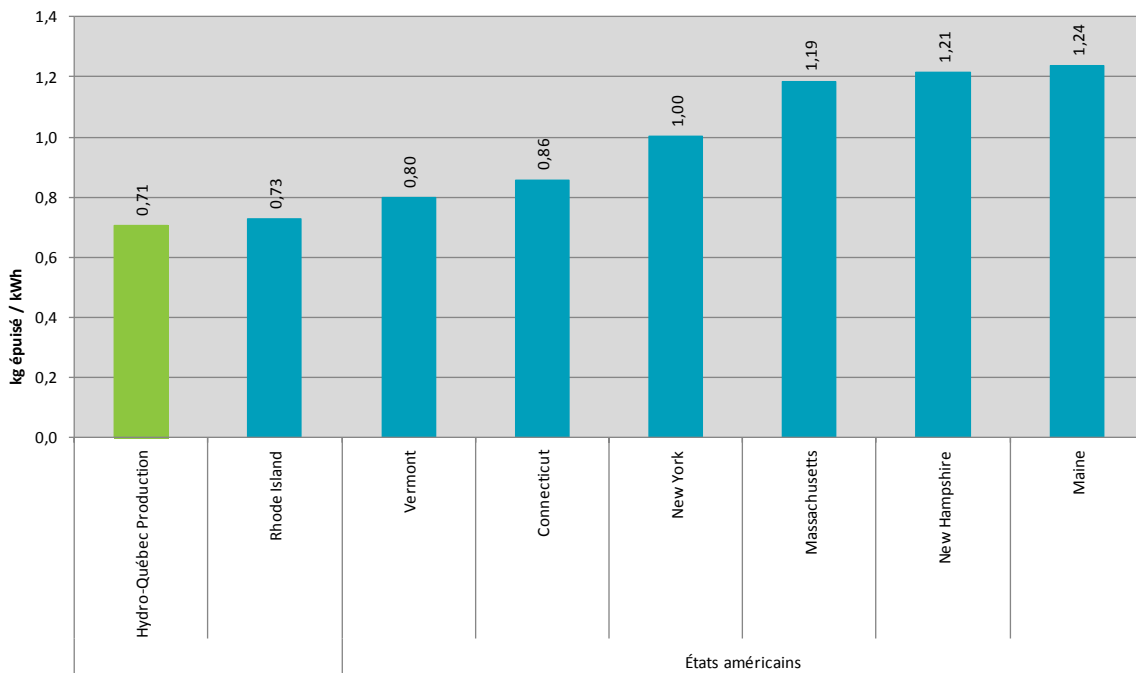


Figure 5 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Extraction de ressources minérales* par kilowattheure produit dans différents États du Nord-Est américain et par Hydro-Québec Production (méthode IMPACT World+).

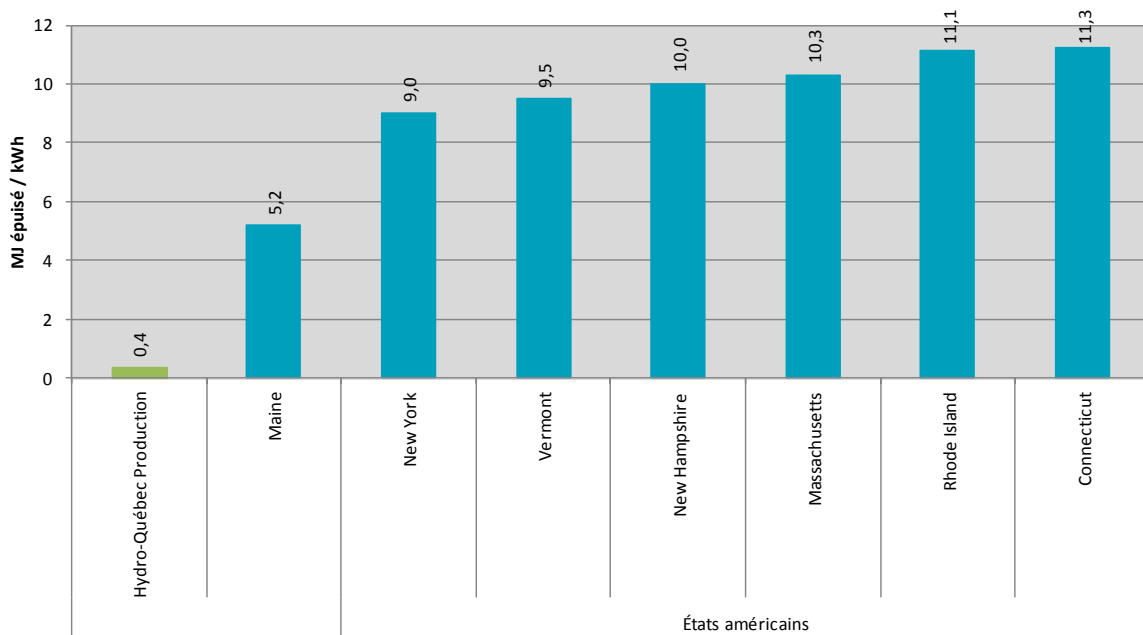


Figure 6 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Utilisation d'énergies fossiles* par kilowattheure produit dans différents États du Nord-Est américain et par Hydro-Québec Production (méthode IMPACT World+).

Les impacts de la production d'électricité par Hydro-Québec sont les plus faibles en comparaison avec ceux des États américains, et ce, pour les deux indicateurs étudiés. Cependant, pour le premier indicateur, les valeurs de toutes les régions restent dans le même ordre de grandeur. Quant à l'*Utilisation d'énergies fossiles*, le Québec présente des indicateurs 10 à 30 fois plus faibles.

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la description des filières électriques et la composition des bouquets d'énergie électrique comparés, une présentation de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés, de même que la liste des références bibliographiques utilisées pour effectuer la comparaison des filières électriques.



HYDRO-QUÉBEC

COMPARAISON DES BOUQUETS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Santé humaine*.

SANTÉ HUMAINE

L'indicateur *Santé humaine*, comme son nom l'indique, est lié aux émissions de substances affectant directement ou indirectement la santé. Pour les fins de réalisation de cette fiche, la plus récente méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie, IMPACT World+ (www.impactworldplus.org), a été employée pour le calcul de cet indicateur.

Avec cette méthode, une multitude de sources d'impacts à la santé humaine sont considérées, en prenant en compte la chaîne complète de cause à effet. L'indicateur *Santé humaine* inclut notamment les substances ayant des effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) et des effets respiratoires, produisant des radiations ionisantes et qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone, au réchauffement climatique ou à l'oxydation photochimique (smog). L'utilisation de l'eau est également prise en compte, de par les effets indirects qu'elle peut entraîner sur la santé.

Ces différents impacts sont ramenés à une unité commune qui représente la gravité de la maladie potentiellement causée par ces substances ou leurs effets indirects et sont exprimés en « année équivalente de vie perdue » (ou DALY pour *Disabled Adjusted Life Years*)¹. Des facteurs de caractérisation issus de modélisations environnementales sont utilisés pour convertir les masses des différentes substances émises en DALY.

Comparaison des bouquets d'énergie électrique

Le bouquet d'énergie électrique représente l'électricité disponible chez le consommateur. Au Québec, ce bouquet comprend à la fois l'électricité produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée auprès de producteurs privés et les importations. De manière plus générale, le bouquet d'énergie électrique d'une région comprend, en proportion, l'ensemble des filières énergétiques qui ont été utilisées pour générer l'électricité distribuée au consommateur. Les activités de transport et de distribution d'électricité y sont également incluses.

¹ L'institut national de santé publique du Québec (INSPQ) présente une description du concept dans un document intitulé « Les années de vie corrigées de l'incapacité : un indicateur pour évaluer le fardeau de la maladie au Québec » (Martel et Steensma, 2012), en ligne : http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1474_AnneesVieCorrigeesIncapacite_IndicEvalFardeauMal.pdf

La Figure 1 présente les résultats de l'indicateur *Santé humaine* des bouquets d'énergie électrique de plusieurs régions (provinces canadiennes, régions américaines², pays), comparés à celui du Québec. Les données environnementales utilisées sont tirées de la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent* v 3.0 (www.ecoinvent.org/database/), et comparées aux données spécifiques d'Hydro-Québec pour l'année 2012.

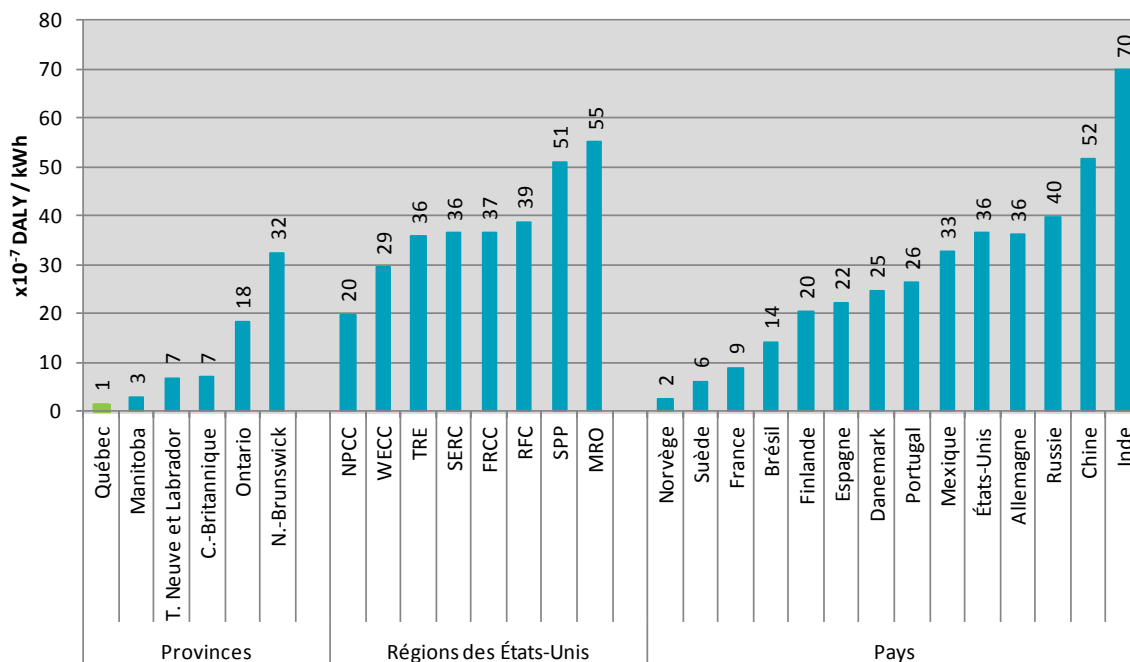


Figure 1 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Santé humaine* par kilowattheure distribué pour différentes juridictions ou régions (méthode IMPACT World+).

Pour la plupart des bouquets évalués, l'indicateur *Santé humaine* est d'abord dominé par les effets liés au *Changement climatique* (impacts à court et long terme) puis, par les effets des substances cancérigènes et non-cancérigènes. Les substances ayant un impact sur le changement climatique sont principalement le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), dont les principales sources sont l'utilisation de combustibles fossiles. Les substances ayant des effets toxiques (cancérigènes et non-cancérigènes) sont les métaux (chrome principalement) et l'arsenic principalement émis lors de l'extraction de matières premières (charbon, lignite, uranium).

Il ressort de cette comparaison que le kilowattheure distribué au Québec, à 1,4x10⁻⁷ DALY/kWh, se situe parmi les approvisionnements électriques ayant les impacts potentiels sur la *Santé humaine* les plus faibles. Il se compare aux autres régions ayant des bouquets d'énergie électrique comprenant une forte part d'hydroélectricité, comme ceux du Manitoba (à 3x10⁻⁷ DALY/kWh) et de la Norvège (2x10⁻⁷ DALY/kWh). Les régions dont les bouquets ont une forte présence d'énergies renouvelables, comme la Suède, la Colombie-Britannique, Terre-Neuve et Labrador et le Brésil, ou une forte présence d'énergie nucléaire comme l'Ontario et la France présentent également des profils avantageux.

Considérant les principales sources et substances influençant l'indicateur *Santé humaine*, on peut conclure que les régions dont le bouquet d'énergie électrique comprend une part importante d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel) présentent les profils environnementaux les moins avantageux. Cette tendance peut

² Les régions électriques de l'Amérique du Nord correspondent aux huit conseils régionaux de la NERC (North American Electric Reliability Corporation), et couvrent le Canada, les États-Unis et une partie du Mexique. Les bouquets d'énergie électrique employés dans la présente étude ne considèrent cependant que la portion produite aux États-Unis.

FRCC : Florida Reliability Coordinating Council; MRO : Midwest Reliability Organization; NPCC : Northeast Power Coordinating Council; RFC : Reliability First Corporation; SERC : SERC Reliability Corporation; SPP : Southwest Power Pool; TRE : Texas Reliability Entity (ou ERCOT) ; WECC : Western Electricity Coordinating Council.

être observée à la Figure 1 : l'Inde, dont le mélange énergétique comprend près de 70 % de charbon, la Chine, avec plus de 75 % de charbon ou la région du Midwest aux États-Unis (MRO), avec 70 % de charbon, présentent des impacts potentiels, en termes de *Santé humaine*, dépassant de plus de 30 fois ceux du mélange énergétique québécois. Il est à noter que l'efficacité des centrales de chaque région joue aussi un rôle sur le profil. Par exemple, la Chine, avec plus de charbon que l'Inde dans son bouquet, présente un profil plus faible grâce à la meilleure efficacité de ses centrales à charbon (elles émettent moins d'un kilogramme de CO₂/kWh) comparée à celles de l'Inde (à 1,4 kg de CO₂/kWh).

La Figure 2 présente, quant à elle, les impacts à la *Santé humaine* associés aux centrales situées dans les États du Nord-Est américain, ainsi que ceux des centrales d'Hydro-Québec Production en 2012. Les impacts associés à la production d'électricité en dehors des frontières des États étudiés ne sont donc pas considérés dans cette figure. Dans le cas des centrales d'Hydro-Québec Production, les impacts associés à la production d'électricité au niveau des réseaux autonomes et des producteurs privés du Québec ne sont pas pris en compte. La composition des bouquets de production des États du Nord-Est américain provient de l'U.S. Energy Information Administration, alors que celle d'Hydro-Québec Production provient d'Hydro-Québec. Les activités de transport d'électricité y sont également incluses.

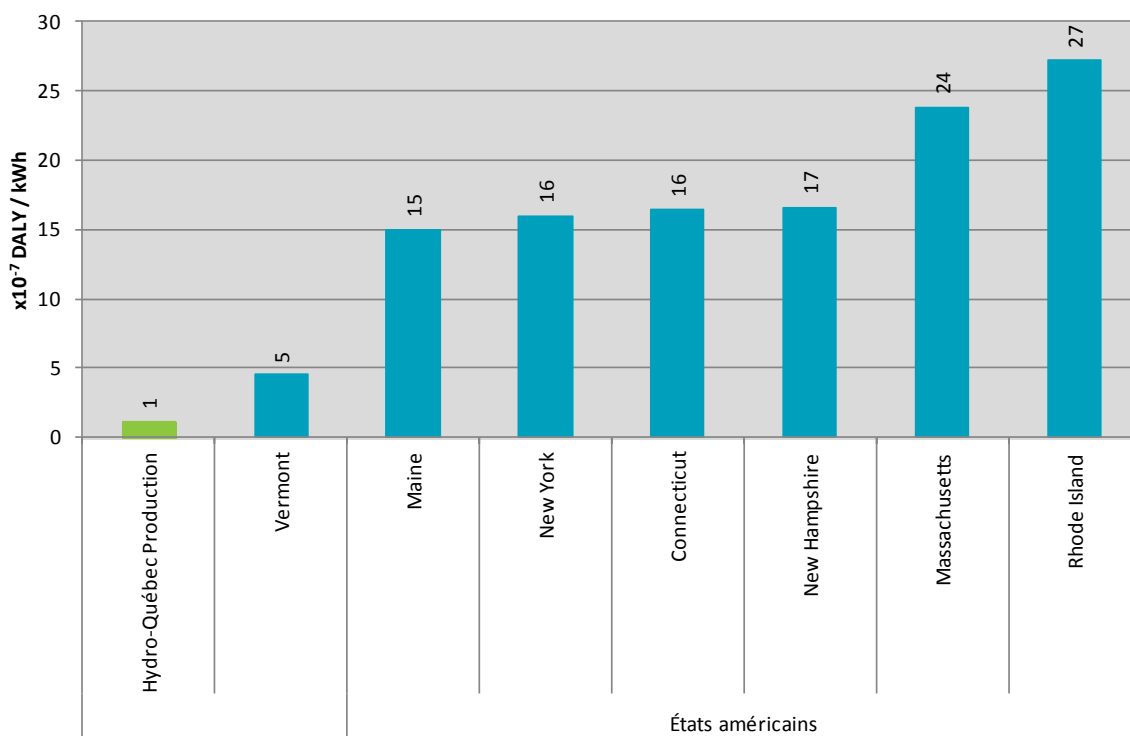


Figure 2 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Santé humaine* par kilowattheure produit dans différents États du Nord-Est américain et par Hydro-Québec Production (méthode IMPACT World+).

Comme dans le cas du kWh distribué au Québec (Figure 1), les impacts potentiels à la *Santé humaine* associés au kWh produit par les centrales d'Hydro-Québec Production en 2012 ($1,1 \times 10^{-7}$ DALY/kWh) sont de 5 à 25 fois inférieurs à ceux des États du Nord-Est américain.

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la composition des bouquets d'énergie électrique comparés, une description de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés.



HYDRO-QUÉBEC

COMPARAISON DES BOUQUETS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Préparé par CIRAIG – Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Date novembre 2014

Une série de neuf fiches a été préparée afin de comparer, selon une approche cycle de vie, l'électricité produite ou distribuée par Hydro-Québec à celle produite par différentes filières ou distribuée dans d'autres régions du monde. Chaque fiche présente les résultats d'un indicateur environnemental parmi les suivants : *Changement climatique, Destruction de la couche d'ozone, Acidification, Eutrophisation, Toxicité humaine, Épuisement des ressources, Oxydation photochimique, Santé humaine et Qualité des écosystèmes*. La présente fiche traite de l'indicateur *Qualité des écosystèmes*.

QUALITÉ DES ÉCOSYSTÈMES

L'indicateur *Qualité des écosystèmes* est lié aux émissions de substances affectant directement ou indirectement la biodiversité. Pour les fins de réalisation de cette fiche, la plus récente méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie, IMPACT World+ (www.impactworldplus.org), a été employée pour le calcul de cet indicateur.

Avec cette méthode, plusieurs sources d'impacts aux écosystèmes sont considérées, en prenant en compte la chaîne complète de cause à effet. L'indicateur *Qualité des écosystèmes* inclut notamment les substances ayant des effets toxiques sur la vie aquatique, produisant des radiations ionisantes, qui contribuent à l'acidification des milieux terrestre et aquatique, à l'eutrophisation des eaux ou au réchauffement climatique. L'utilisation des terres et l'utilisation de l'eau sont également pris en compte, de par les effets qu'elles peuvent avoir sur la biodiversité animale et végétale. Les impacts associés à la création de réservoirs et à la mise en place de barrages ne sont toutefois pas considérés, faute de facteurs de caractérisation représentatifs de leurs impacts potentiels.

Ces différents impacts sont ramenés à une unité commune qui représente la fraction d'espèces potentiellement disparues, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps (PDF.m².an) (où PDF signifie *Potentially Disappeared Fraction*). Des facteurs de caractérisation issus de modélisations environnementales sont utilisés pour convertir les masses des différentes substances émises en PDF.m².an.

Comparaison des bouquets d'énergie électrique

Le bouquet d'énergie électrique représente l'électricité disponible chez le consommateur. Au Québec, ce bouquet comprend à la fois l'électricité produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée auprès de producteurs privés et les importations. De manière plus générale, le bouquet d'énergie électrique d'une région comprend, en proportion, l'ensemble des filières énergétiques qui ont été utilisées pour générer l'électricité distribuée au consommateur. Les activités de transport et de distribution d'électricité y sont également incluses.

La Figure 1 présente les résultats de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* des bouquets d'énergie électrique de plusieurs régions (provinces canadiennes, régions américaines¹, pays), comparés à celui du Québec. Les données environnementales utilisées sont tirées de la base de données d'inventaire du cycle de vie

¹ Les régions électriques de l'Amérique du Nord sont au nombre de huit et couvrent le Canada, les États-Unis et le Mexique. Les bouquets d'énergie électrique employés dans la présente étude ne considèrent cependant que la portion produite aux États-Unis.

FRCC : Florida Reliability Coordinating Council; MRO : Midwest Reliability Organization; NPCC : Northeast Power Coordinating Council; RFC : Reliability First Corporation; SERC : SERC Reliability Corporation; SPP : Southwest Power Pool; TRE : Texas Reliability Entity (ou ERCOT) ; WECC : Western Electricity Coordinating Council.

ecoinvent v 3.0 (www.ecoinvent.org/database/), et comparées aux données spécifiques d'Hydro-Québec pour l'année 2012.

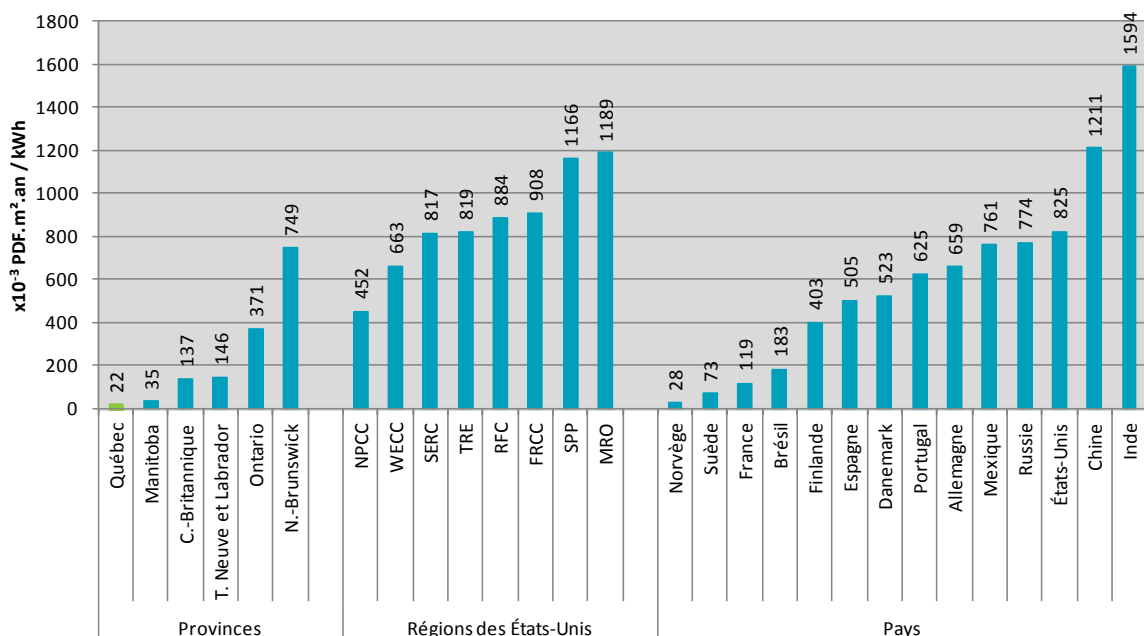


Figure 1 : Comparaison des résultats d'indicateur *Qualité des écosystèmes* par kilowattheure distribué pour différentes juridictions ou régions (méthode IMPACT World+).

Pour la plupart des bouquets évalués, l'indicateur *Qualité des écosystèmes* est d'abord dominé par les effets liés au *Changement climatique* (impacts à court et long termes), puis par les effets de l'*Acidification marine et terrestre*. Les substances ayant un impact sur le *Changement climatique* sont principalement le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), dont les principales sources sont l'utilisation de combustibles fossiles. Les substances ayant des effets acidifiants sont le CO₂ dans le cas des écosystèmes marins, et le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x) dans le cas des écosystèmes terrestres. Les sources de ces derniers sont la combustion de charbon et de mazout (émissions de SO₂), la combustion de gaz naturel et, dans une moindre mesure, de biomasse (émissions de NO_x).

Considérant les principales sources et substances influençant l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, il ressort de cette comparaison que le kilowattheure distribué au Québec, à 22x10⁻³ PDF.m².an/kWh, se situe parmi les approvisionnements électriques les plus avantageux. Il se compare aux autres régions ayant des bouquets d'énergie électrique comprenant une forte part d'hydroélectricité, comme ceux du Manitoba (à 35x10⁻³ PDF.m².an /kWh) et de la Norvège (28x10⁻³ PDF.m².an /kWh). Les régions dont les bouquets ont une forte présence d'énergies renouvelables, comme la Suède, la Colombie-Britannique, Terre-Neuve et Labrador et le Brésil, ou une forte présence d'énergie nucléaire, comme l'Ontario et la France, présentent également des profils avantageux.

Au contraire, les régions dont le bouquet d'énergie électrique provient en grande partie de combustibles fossiles dont l'Inde, avec près de 70 % de charbon dans son bouquet, la Chine, avec plus de 75 % de charbon ou la région du Midwest aux États-Unis (MRO), avec 70 % de charbon, présentent des impacts potentiels, en termes de *Qualité des écosystèmes*, dépassant de plus de 500 fois ceux du bouquet d'énergie électrique québécois. Parmi les régions qui utilisent majoritairement des sources fossiles, celles qui priorisent le gaz naturel apparaissent plus avantageuses que celles qui utilisent majoritairement du charbon. C'est le cas pour la Russie (65 % de sources fossiles mais presque 50 % de gaz naturel) ou la région de la Floride (FRCC), avec 84 % de sources fossiles mais plus de 55 % de gaz naturel.

La Figure 2 présente, quant à elle, les résultats de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* des centrales situées dans les États du Nord-Est américain, ainsi que ceux des centrales d'Hydro-Québec Production en 2012. Les impacts potentiels associés à la production d'électricité en dehors des frontières des États étudiés ne sont donc pas considérés dans cette figure. Dans le cas d'Hydro-Québec Production, les impacts potentiels associés

à la production d'électricité au niveau des réseaux autonomes et des producteurs privés du Québec ne sont pas pris en compte. La composition des bouquets de production des États du Nord-Est américain provient de l'U.S. Energy Information Administration, alors que celle d'Hydro-Québec Production provient d'Hydro-Québec. Les activités de transport d'électricité y sont également incluses.

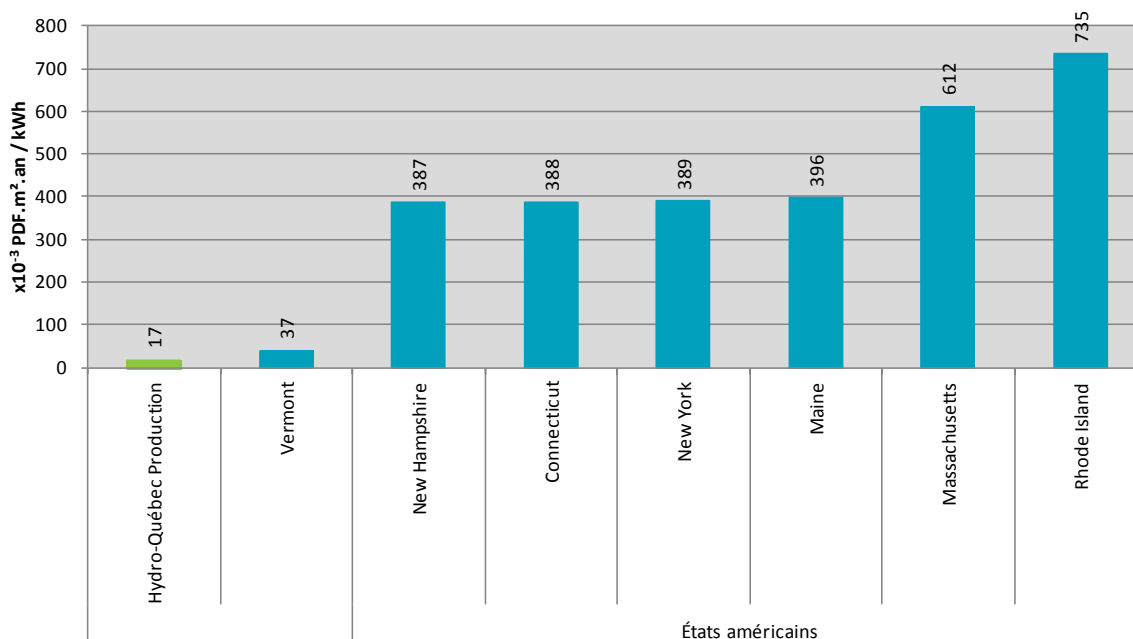


Figure 2 : Comparaison des résultats de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* par kilowattheure produit dans différents États du Nord-Est américain et par Hydro-Québec Production (méthode IMPACT World+).

Comme dans le cas du kWh distribué au Québec (Figure 1), les impacts associés au kWh produit par les centrales d'Hydro-Québec Production en 2012 (17×10^{-3} PDF.m².an /kWh) se comparent avantageusement à celles des centrales de productions d'électricité des États du Nord-Est américain. L'État du Vermont, avec une forte présence d'énergie nucléaire, présente également un indicateur *Qualité des écosystèmes* également très faible (37×10^{-3} PDF.m².an /kWh). Cet état dépend toutefois en grande partie des importations pour répondre à ces besoins en électricité. Les autres états présentent des indicateurs 20 à 40 fois plus importants que ceux du Québec.

Le détail des éléments utilisés pour la réalisation de ces analyses est fourni dans le rapport accompagnant les fiches comparatives, intitulé « Comparaison des filières de production d'électricité » (novembre 2014). On y trouve notamment un résumé de l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'électricité québécoise, la composition des bouquets d'énergie électriques comparés, une description de l'ACV et des indicateurs environnementaux les plus couramment utilisés.

Annexe B : Glossaire

En plus des définitions présentées ici, d'autres peuvent être trouvées en ligne :

- Filières de production d'électricité (en anglais) : http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Annex_I.pdf
- Électricité et infrastructures électriques : <http://www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/vocabulaire.html>
- Analyse du cycle de vie : <http://www.empreintecarbonequebec.org/fr/lexique.php>
- Analyse du cycle de vie : http://pedagotech.inp-toulouse.fr/131010/co/ACV_CS_web_1.html

ACV attributionnelle

L'ACV attributionnelle décrit les flux physiques (matière et énergie) qui transitent entre un système et l'environnement tout au long de son cycle de vie. Elle est définie comme cela en opposition à l'ACV conséquentielle, qui décrit la manière dont seront affectés les échanges de flux physiques entre le système et l'environnement en réponse à des possibles décisions.

centrale à réservoir

Centrale alimentée par l'eau accumulée dans un lac artificiel créé au moyen d'un barrage.

centrale à turbines à gaz

Centrale qui utilise une ou plusieurs turbines à gaz (alimentées avec du gaz naturel ou du mazout) pour entraîner un ou plusieurs alternateurs.

** Les centrales à turbines à gaz du réseau d'Hydro-Québec fonctionnent aux heures de pointe.*

centrale au fil de l'eau

Centrale alimentée directement par un cours d'eau et ne disposant pratiquement d'aucune réserve. Sa puissance varie donc suivant le débit du cours d'eau.

centrale diésel/centrale thermique à moteurs diésel

Centrale produisant de l'énergie à partir de la combustion d'un hydrocarbure dans un ou plusieurs moteurs diésel.

centrale éolienne

Centrale produisant de l'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent.

** L'alternateur est entraîné par une turbine actionnée par la force du vent.*

centrale hydroélectrique/centrale hydraulique

Centrale dans laquelle l'énergie mécanique de l'eau est transformée en énergie électrique.

** On classe les centrales de ce type en deux catégories principales : les centrales à réservoir et les centrales au fil de l'eau.*

centrale thermique

Centrale produisant de l'énergie électrique à partir de l'énergie thermique.

** Parmi les centrales de ce type, on retrouve notamment les centrales thermiques classiques, les centrales nucléaires, les centrales à moteurs diésel et les centrales à turbines à gaz.*

centrale thermique classique

Centrale qui fonctionne à partir de la vapeur sous pression produite par la combustion d'un hydrocarbure ou de charbon dans une chaudière à vapeur. Cette vapeur sert à faire tourner des turbines reliées à des alternateurs.

centrale (thermique) nucléaire

Centrale qui fonctionne à partir d'un réacteur nucléaire, lequel chauffe l'eau qui, transformée en vapeur, fait tourner une turbine reliée à un alternateur.

énergie renouvelable

Une énergie est dite renouvelable si elle est réapprovisionnée par les processus naturels à un taux égal ou supérieur à son taux d'utilisation. Elle inclut les ressources comme la biomasse, l'énergie solaire, la chaleur géothermique, l'hydroélectricité, les marées et les vagues et l'énergie éolienne (IPCC, 2011).

énergie fossile

Énergie de source non renouvelable telle que le charbon, le pétrole et le gaz naturel.

éolienne

Machine permettant de transformer l'énergie éolienne en énergie électrique.

gaz à effet de serre (GES)

Gaz qui absorbent l'énergie émise par la Terre (sous forme de rayonnement infrarouge) et qui la rayonnent, à leur tour, vers le sol, provoquant ainsi un réchauffement de la surface du globe.

** Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique et le méthane.*

kilowatt (kW)

Multiple du watt (1000 fois), unité de mesure de la puissance.

kilowattheure (kWh)

Multiple du wattheure, unité de mesure de l'énergie électrique et de la consommation. Un kWh vaut 3,6 mégajoules (MJ) et correspond à la consommation d'un appareil électrique de mille watts pendant une heure.

ligne de distribution

Ligne aérienne ou souterraine fournissant l'énergie électrique aux clients à partir d'un poste de distribution.

ligne de transport ou de répartition

Ligne aérienne ou souterraine servant au transport ou à la répartition de l'énergie électrique à une tension de 44 à 765 kilovolts.

mégawatt (MW)

Multiple du watt (1 000 000 fois), unité de mesure de la puissance.

puissance

Capacité d'accomplir un travail, qui s'exprime généralement en watts (W), kilowatts (kW) et mégawatts (MW).

réseau (électrique)

Ensemble organisé d'installations pouvant comprendre des équipements de production, de transport, de répartition ou de distribution de l'électricité.

réseau principal d'Hydro-Québec

Réseau électrique de la Société excluant les réseaux autonomes alimentant les communautés isolées du Québec.

réseau voisin

Réseau hors Québec ou réseau québécois n'appartenant pas à Hydro-Québec.

Annexe C : Recherche bibliographique

L'objectif de la revue bibliographique était d'extraire des résultats d'impact ACV associés à toutes les formes de production d'électricité et publiés depuis 2007. L'approche employée est décrite dans les sections qui suivent.

À noter que Moomaw et coll. (2011) ont procédé à une analyse similaire (uniquement pour l'indicateur *Potentiel de réchauffement global*) pour le compte du GIEC. Pour toutes les filières de production d'électricité, ils ont ainsi compilé les informations publiées quant aux émissions de gaz à effet de serre. Les références citées par Moomaw et coll. (2011) ont été intégrées à la liste des études répertoriées pour la présente analyse.

C.1 Recensement des références bibliographiques

La revue de littérature a été effectuée selon les méthodes de recherche reconnues et utilisées au sein du CIRAIG. Le Tableau C-1 liste les principales bases de données et moteurs de recherche consultés pour le recensement des références bibliographiques. D'autres engins consultés n'ont pas été listés ici, car ils n'ont fourni aucun résultat ou des résultats déjà obtenus ailleurs.

Tableau C-1 : Bases de données et moteurs de recherche disponibles

Bases de données/ Moteurs de recherche	Liens
Académique	
ABI/Inform trade and Industry	http://www.proquest.com/products-services/abi_inform_trade.html
Google Scholar	http://scholar.google.ca
Web of Science	http://wokinfo.com
Compendex	www.engineeringvillage.com
Envirodec	http://www.environdec.com
Revue avec accent ACV	
International Journal of LCA	www.springer.com/environment/journal/11367
Journal of Industrial Ecology	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/%28ISSN%291530-9290
Journal of Cleaner Production	http://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production/

Des recherches plus poussées ont également été effectuées pour avoir accès à des rapports provenant de l'industrie ou d'organismes gouvernementaux ou d'organisations non gouvernementales.

Plus précisément, le recensement de la littérature s'est fait sur le corpus des revues scientifiques à comité de lecture ainsi que parmi la littérature « grise » des rapports scientifiques, thèses et publications non révisées par les pairs, depuis l'année 2007 pour identifier les études ACV sur les filières de production d'électricité.

La stratégie de recherche suivie comprenait trois étapes :

1. Définir la question de recherche et le choix des mots clés;
2. Recherche de la littérature et recueil de l'information;
3. Élimination des éventuels doublons, des références hors sujet (« faux positifs »)

Les termes de recherche employés comprenaient :

LCA (+ termes de recherche équivalents incluant "life cycle assessment" ou "ISO 14044") et ("electricity" ou "power generation" ou "power plant" ou "electric power plant").

Toutes les recherches ont été effectuées dans les champs "Mots clés" ou "Titre/abstract/mots clés" pour les engins de recherche sur engineering.village.com. Seules les références datant de 2007 et plus ont été colligées de manière à ne considérer que les études utilisant les plus récents outils d'ACV.

Les doublons ont été retirés et un tri manuel des articles a ensuite été réalisé pour en retirer les publications hors sujets, liées aux termes suivants :

"fuel" ou "biofuel" ou "medical" ou "pharmaceutical" ou "lumber" ou "paper".

À l'issue de cette première phase de recherche, 212 références ont été retenues.

C.2 Tri des références

Dans un deuxième temps, les publications retenues ont été triées en fonction des critères suivants :

- Études ACV de type « attributionnel »;
- Modèle d'étude incluant toutes les étapes de vie;
- Contexte géographique lié à l'Amérique du Nord ou des régions de climat similaire;
- Idéalement, évaluation des impacts couvrant plusieurs indicateurs environnementaux (études ACV complètes, permettant de mettre en perspective les impacts des GES par rapport aux autres);
- Filières de production électriques opérées à grande échelle ou bien caractérisées (pas de projets pilotes ni de technologies trop nouvelles ou rares).

Les articles synthèses, faisant la revue d'études précédemment publiées, ont également été retenus lorsqu'ils présentaient des résultats d'impacts.

Bien qu'il ne s'agisse pas de critères mesurables, la fiabilité et la complétude des ACV retenues ont également été prises en compte, du fait qu'elles ont été publiées dans des revues avec comité de lecture; constituaient des Déclarations environnementales de produits (DEP ou EPD en anglais) revues par des pairs; ou faisaient partie de rapports gouvernementaux ou d'organismes reconnus. Dans tous les cas, les sources ont été jugées fiables par l'analyste du CIRAIG.

À l'issue de cette seconde étape, 87 références ont été retenues.

C.3 Compilation des résultats existants

Cette dernière étape consistait à lire et à synthétiser les résultats des études retenues, afin de répertorier les résultats publiés et permettre une comparaison des filières de production électrique selon différents impacts environnementaux potentiels. Au final, 66 références ont servi à compiler plus de 1 000 résultats couvrant une dizaine de filières et plus de vingt indicateurs environnementaux de natures diverses.