



CHAIRE INTERNATIONALE SUR LE CYCLE DE VIE



RAPPORT TECHNIQUE

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DE FILIÈRES DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À PETITE ÉCHELLE

Mai 2013

Préparé pour :

Hydro-Québec

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

Ce rapport a été préparé par la Chaire internationale sur le cycle de vie, unité de recherche du CIRAI (le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services).

Fondé initialement par l'École Polytechnique de Montréal, en collaboration avec l'Université de Montréal et l'École des Hautes Études Commerciales de Montréal, le CIRAI a été mis sur pied afin d'offrir aux entreprises et aux gouvernements une expertise universitaire de pointe sur les outils du développement durable. Le CIRAI est le seul centre de recherche interuniversitaire sur le cycle de vie au Canada. Il est également un des plus importants sur le plan international.

AVERTISSEMENT :

À l'exception des documents entièrement réalisés par le CIRAI, comme le présent rapport, toute utilisation du nom du CIRAI ou de l'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL 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 CIRAI ou de l'École Polytechnique.

Chaire internationale sur le cycle de vie

Unité de recherche du CIRAI

École Polytechnique de Montréal

Département de génie chimique

2900, Édouard-Montpetit

Montréal (Québec) Canada

C.P. 6079, Succ. Centre-ville

H3C 3A7

<http://www.chaire-cycledevie.org/fr/>

Équipe de travail

Réalisation

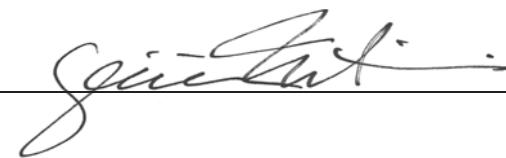
Mourad Ben Amor, Ph.D.

Réalisation de l'ACV des filières électriques



Geneviève Martineau, ing., M.Sc.A.

Analyste senior, Révision interne et réponse
aux réviseurs



Collaboration

Renée Michaud, ing., M. Ing.

Directrice des affaires industrielles

Coordination du projet

Projet réalisé sous la responsabilité du Pr. Réjean Samson, ing., Ph.D.

Revue critique par un comité de parties prenantes

Gontran Bage, ing. Ph.D.

Ingénieur senior, chez Dessau au moment d'initier la revue critique

Présidence du comité de révision

Antoine Lacroix, ing. M. Sc.

CanmetÉnergie – Ressources naturelles Canada

Révision

Yves Poissant, Ph.D.

CanmetÉnergie – Ressources naturelles Canada

Révision

Sommaire

Hydro-Québec a mandaté la Chaire internationale sur le cycle de vie pour qu'elle analyse et compare, au moyen de la méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV), différentes filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle.

Les objectifs de cette étude consistent à :

1. Établir le profil environnemental du cycle de vie de différents systèmes génériques de production décentralisée d'énergie électrique utilisés dans des conditions climatiques québécoises moyennes;
2. Identifier les points chauds (c.-à-d. les plus grands contributeurs à l'impact) et les paramètres clés (c.-à-d. les paramètres qui influencent le plus le bilan environnemental) propres aux différents systèmes à l'étude;
3. Comparer les systèmes entre eux et avec le réseau d'Hydro-Québec (système de référence).

Les technologies modélisées sont dites *à petite échelle*, car elles fournissent moins de 50 kilowatts (kW) (soit un maximum théorique de 438 000 kilowattheures (kWh)/an, considérant une production efficace à 100 % durant toute l'année), et leur énergie est dite *décentralisée*, car leur exploitation se fait à proximité des bâtiments à approvisionner. De telles installations permettent à leurs propriétaires de produire l'énergie électrique. Ce type de production énergétique est actuellement admissible à l'option de mesurage net pour autoproducateurs d'Hydro-Québec (www.hydroquebec.com/autoproduction/index).

En tout, cinq technologies ont été retenues. Elles représentent les systèmes les plus fréquemment utilisés en contexte québécois pour la production décentralisée d'énergie électrique :

- Systèmes éoliens
 1. Éolienne de petite puissance de 30 kW : durée de vie de 20 ans, production de 52 560 kWh/an en moyenne.
 2. Éolienne de petite puissance de 10 kW : durée de vie de 20 ans, production de 22 756 kWh/an en moyenne.
 3. Éolienne de petite puissance de 1 kW : durée de vie de 20 ans, production de 2 314 kWh/an en moyenne.
- Systèmes solaires photovoltaïques
 4. Panneaux solaires photovoltaïques monocristallins de 3 kWp (kilowatt-peak) : durée de vie de 30 ans, production de 3 450 kWh/an en moyenne.
 5. Panneaux solaires photovoltaïques polycristallins de 3 kWp : durée de vie de 30 ans, production de 3 450 kWh/an en moyenne.

Le système de référence (le réseau) comprend quant à lui l'énergie produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée de producteurs privés et les importations, de manière à représenter l'électricité disponible chez le consommateur en 2011. Le mélange d'approvisionnement final considéré est composé à 95,73 % d'hydroélectricité; 2,37 % de nucléaire; 0,35 % de charbon; 0,19 % de gaz naturel; 0,74 % d'éolien et 0,51 % de biomasse.

Pour pouvoir comparer les différentes technologies entre elles, et avec l'électricité du réseau d'Hydro-Québec, une base commune de comparaison (ou unité fonctionnelle) a été identifiée et se définit comme suit :

« *Produire et distribuer un kWh d'électricité au Québec, en 2011* ».

Toutes les étapes « du cycle de vie » des technologies ont été prises en compte dans la présente étude : la production, le transport et l'installation des composantes des systèmes, l'étape d'utilisation et leur fin de vie. Pour ce qui est de l'énergie du réseau d'Hydro-Québec, les infrastructures du réseau de même que les étapes de production, achats et importation, de transmission et de distribution d'électricité (incluant les pertes en ligne) ont été incluses.

Cette étude a été réalisée à partir de données génériques issues de banques de données commerciales ou de la banque de données du CIRAI, d'informations transmises par des entrepreneurs, de rapports d'études diverses, ou d'autres sources publiées. Dans tous les cas, les données sélectionnées sont représentatives de systèmes de production décentralisée d'énergie électrique appliqués au Québec, sans pour autant couvrir toutes les options disponibles sur le territoire.

La méthode européenne **IMPACT 2002+** (Jolliet et coll., 2003) a été employée pour **l'évaluation des impacts du cycle de vie**, car elle permet une agrégation des résultats de quinze indicateurs d'impacts en quatre catégories de dommages : *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique* et *Ressources*. Les indicateurs d'impacts *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*, non pris en compte dans ces catégories, ont été évalués en conjonction avec les indicateurs de dommage pour compléter l'évaluation des impacts du cycle de vie.

Résultats

Profils environnementaux des systèmes

La première analyse a permis d'identifier les processus et paramètres qui contribuent le plus aux impacts potentiels des différents systèmes. Ces profils environnementaux ont fait ressortir les éléments suivants.

Pour le système de référence (**réseau d'Hydro-Québec**) :

- Les **grands contributeurs** sont l'étape de production et de distribution d'électricité;
- Les impacts potentiels associés à l'étape de production d'électricité sont principalement dus aux importations d'énergie générée à partir de sources fossiles (charbon, gaz naturel) ;
- Le réseau de distribution contribue fortement à l'indicateur *Qualité des écosystèmes* à cause de la lixiviation des produits de préservation des poteaux de bois et de la production des câbles de distribution. Il faut cependant noter que les modèles d'évaluation employés pour caractériser les émissions toxiques ont tendance à surestimer les impacts potentiels des métaux émis au sol.

Pour les **systèmes éoliens** :

- Les **grands contributeurs** sont les étapes de production et de distribution des composantes, à cause de l'importance des infrastructures et de leur transport. La partie fixe (tour et fondation) compte pour une part assez importante des impacts potentiels de l'étape de production des systèmes. Pour les parties mobiles, la nacelle, les

raccordements et l'onduleur des éoliennes de 1 et 10 kW sont les éléments qui ressortent le plus.

- Les **paramètres clés** sont : la puissance, la durée de vie, la nature et la masse de ces composantes.
- Une attention particulière devrait aussi être portée à l'étape de distribution par camion des composantes jusqu'au site d'installation, sachant que leur distance de transport influence de manière non négligeable les impacts environnementaux potentiels.

Pour les **systèmes solaires photovoltaïques** :

- Le **grand contributeur** est l'étape de production, et plus particulièrement la production de la cellule photovoltaïque, du cadre d'aluminium du panneau et du verre solaire;
- Les **paramètres clés** qui ressortent de cette analyse sont la durée de vie et le lieu de fabrication des cellules photovoltaïques (soit la nature de l'énergie utilisée pour leur production).
- Il y aurait lieu de privilégier des fabricants de cellules localisés au Québec où dans des endroits ayant une faible dépendance aux énergies fossiles.

Comparaison des systèmes sur la base de la production de 1 kWh d'énergie électrique

La seconde analyse a permis de comparer les systèmes de production décentralisée d'énergie électrique entre eux et avec le réseau provincial d'Hydro-Québec, sur la base de la production de 1 kWh d'énergie électrique.

Dans cette analyse, l'indicateur *Qualité des écosystèmes* favorise tous les systèmes de production décentralisée d'énergie électrique par rapport au réseau d'Hydro-Québec, à cause des émissions toxiques au sol potentiellement engendrées par le réseau de distribution du système de référence (poteaux de bois traité). Cependant, les modèles de caractérisation actuellement disponibles ont tendance à surestimer l'impact potentiel des métaux émis au sol, engendrant d'importantes incertitudes pour cet indicateur. Afin de tester la robustesse des résultats de cette catégorie de dommage, une analyse de sensibilité avec une seconde méthode d'évaluation – ReCiPe – a été réalisée et a montré que les tendances observées sont inversées entre les deux méthodes. Il n'est donc pas possible de conclure sur la base de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* et pour ne pas apporter de confusion, il a été choisi de retirer cet indicateur de la Figure 1 et pour la suite de l'analyse.

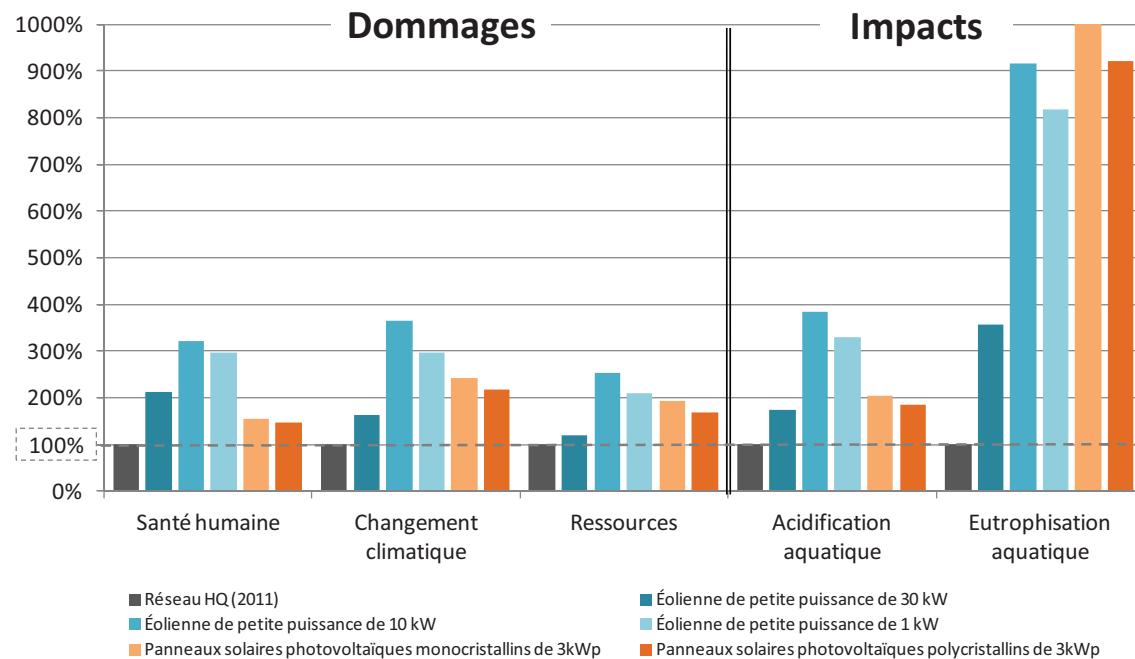


Figure 1 : Comparaison environnementale des systèmes à l'étude par rapport au kWh d'électricité distribué par Hydro-Québec.

Globalement, on retient que dans un contexte de conditions climatiques moyennes représentatives du Québec :

- Le kWh distribué par le réseau d'Hydro-Québec est favorisé par rapport aux cinq systèmes de production décentralisée d'énergie évalués selon les indicateurs les indicateurs *Santé humaine*, *Changement climatique*, *Ressources*, *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*.
- Les émissions de métaux au sol, engendrées par les poteaux de bois traité du réseau de distribution d'Hydro-Québec, présentent un impact potentiellement important. Il n'est cependant pas possible de les évaluer avec les modèles de caractérisation actuels.
- L'éolienne de petite puissance de 30 kW présente une meilleure performance environnementale que les éoliennes de 10 et de 1 kW. Il constitue également le système de production décentralisée qui a le plus de potentiel de présenter un bénéfice environnemental global par rapport au kWh distribué par le réseau d'Hydro-Québec.
- Les panneaux photovoltaïques de type monocristallins et polycristallins présentent des profils environnementaux similaires.
- La comparaison environnementale des cinq systèmes de production d'énergie renouvelable favorise l'éolienne de 30 kW selon les catégories *Changement climatique*, *Ressources*, et *Eutrophisation aquatique*, alors que l'indicateur *Santé humaine* favorise les panneaux solaires et que les indicateurs *Qualité des écosystèmes* et *Acidification aquatique* ne permettent pas de trancher entre l'éolienne de 30 kW et les panneaux photovoltaïques. En fonction de l'importance relative accordée aux différentes catégories évaluées, les décideurs peuvent donc choisir l'un ou l'autre des systèmes de production décentralisée d'énergie électrique.

Cinq analyses de sensibilité ont également été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses de modélisation sur les conclusions de l'étude. Le rendement annuel moyen des systèmes solaires photovoltaïques et éoliens ; la distance de transport des composantes des systèmes éoliens ; le lieu de production des panneaux et cellules photovoltaïques ; la source d'approvisionnement énergétique marginale évitée par la production d'électricité à petite échelle et la méthode d'évaluation des impacts ont été modifiés pour évaluer leur effet sur les résultats.

Le tableau 1 résume les conclusions de l'ensemble des analyses réalisées. La classification des systèmes de production décentralisée d'énergie électrique qui y est présentée est applicable dans la mesure où les technologies considérées et les conditions météorologiques sont semblables à celles modélisées dans la présente étude.

Tableau 1 : Résultats des tendances observées par rapport à l'énergie du réseau d'Hydro-Québec et classement des systèmes de production d'énergie électrique décentralisée

Indicateur (IMPACT 2002+)	Éolienne de petite puissance de 30 kW	Éolienne de petite puissance de 10 kW	Éolienne de petite puissance de 1 kW	Panneaux photovoltaïques monocristallins de 3kW	Panneaux photovoltaïques polycristallins de 3kW
Santé humaine	2	4	3	1	1
Qualité des écosystèmes					
Changement climatique	1	4	3	2	2
Ressources	1	5	4	3	2
<i>Acidification aquatique</i>	1	4	3	1	1
<i>Eutrophisation aquatique</i>	1	4	3	2	2
Légende		Le kWh du réseau de HQ présente moins d'impact potentiel que le système de production décentralisée			
		L'analyse de base favorise le kWh du réseau de HQ, mais cette conclusion pourrait être inversée selon les hypothèses considérées			
		il n'est pas possible de trancher quant à l'avantage d'une option sur l'autre			
	1-5	Classification des technologies selon leur performance. « 1 » représente le choix de technologie à privilégier pour réduire les impacts potentiels pour un indicateur environnemental donné.			

Enfin, l'analyse sur le type d'énergie marginale que permettent de remplacer les systèmes de production décentralisée a permis de conclure que tous les systèmes de production décentralisée d'énergie électrique évalués présentent un bénéfice environnemental important dès lors qu'ils permettent de réduire les importations ou d'augmenter les exportations d'Hydro-Québec vers les territoires voisins plus fortement dépendants des énergies fossiles.

Perspectives et recommandations

La présente étude est balisée en fonction des particularités d'un contexte énergétique de faible puissance, représentatif des conditions climatiques québécoises moyennes. D'autres contextes d'utilisation ou d'autres types de puissances énergétiques présentent également un intérêt : par exemple, les régions éloignées du Québec qui ne sont pas raccordées au réseau utilisent des sources énergétiques de types fossiles pour leurs besoins électriques. En continuité avec le présent projet, il serait intéressant d'élargir le champ de l'analyse afin d'inclure un éventail plus

large de contextes d'utilisation. La présente étude a aidé à la définition d'un cadre méthodologique qui pourrait être adapté à ce type de problématique.

Enfin, des modèles différents de systèmes pourraient être adaptés au contexte résidentiel. Par exemple, il existe dans le domaine agricole des panneaux solaires photovoltaïques conçus pour suivre la position du soleil, ce qui permet d'accroître leur production électrique de 20 à 40 %. Un tel système pourrait éventuellement être modélisé pour en évaluer la performance.

Cette ACV vise à établir le profil environnemental de cycle de vie de différentes technologies de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle, et à les comparer. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.