

---

# VertigO

---

VertigO – la revue électronique en sciences de l’environnement, Vol 5, No 1, mai 2004

---

## ÉDITORIAL

Par E. Duchemin et S. Hamel-Dufour

Rédacteur en chef, Co-rédactrice,  
courriel: [vertigoweb@sympatico.ca](mailto:vertigoweb@sympatico.ca)

### La ville : Lorsque le développement compromet le tissu social.

Les années 1960-1970 ont vu plus d’une ville, tout particulièrement en Amérique du Nord, se transformer sous les pics et les pelles mécaniques. Des pans de quartier entier sont ainsi disparus, se sont trouvés scindés en deux, des milieux naturels ont été rasés ou endigués pour laisser la place à des édifices en hauteur, des routes et autoroutes. Nous pourrions nommer cette époque l’Ère du béton. Certes, certaines innovations technologiques ont accompagné l’effervescence de ce développement, que l’on pense notamment à l’implantation du métro dans la ville de Montréal, dont les résidus de construction ont, sans ironie, permis la construction de deux îles qui trônent aujourd’hui au milieu du fleuve St-Laurent.

Les conséquences sociales des décisions économiques et de développement de cette époque sont encore visibles aujourd’hui dans les quartiers touchés par ces réaménagements brutaux. Mais depuis, suite la crise de la gouvernance technocratique qu’ont connue les gouvernements des pays industrialisés, les citoyens se sont regroupés et ont exigé d’être partie prenante dans les décisions qui ont un impact direct sur leur qualité de vie, personnelle et de quartier. Ce n’est peut-être pas toutes les villes qui ont accepté de se prêter au jeu de la participation du public, ni surtout accepté de jouer le jeu jusqu’au bout, mais force est de constater que les citoyens sont désormais un facteur à ne pas négliger dans la planification des projets d’aménagement. Les villes de leur côté doivent dépasser l’effort de concertation, pour tenter l’effort de conciliation entre leurs impératifs économiques et de développement, tout en assurant à leurs habitants, ceux qui font en sorte qu’elles existent, le respect de leur vie de quartier.

Un des outils auquel recours de plus en plus les planificateurs pour atteindre cette conciliation d’intérêts est la mixité des usages. Ainsi, en tentant de valoriser la cohabitation de logements sociaux, habitations de luxe, bureaux et commerces, centres de technologie et multimédias, les urbanistes et aménagistes cherchent à redonner un souffle à des zones mal aimées. Sous ces bonnes intentions, une réalité perdure : trop souvent ces quartiers «revampés» accueillent les travailleurs durant le jour, qui font vivre les commerces de service venus s’y installer pour profiter du regain de vitalité économique, mais retombent en somnolence les soirs de semaine et pendant la fin de semaine. Paris, Londres, New-York, Montréal, Vancouver, toutes les grandes villes connaissent ce phénomène.

## DANS CE NUMÉRO

### Perspective

- Prévenir les conflits et promouvoir la coopération dans la gestion des fleuves transfrontaliers en Afrique de l’Ouest, Madiodio Nlase

### Dossier: Énergie

- Le Québec élève modèle du Canada dans le dossier des émissions de gaz à effet de serre : concours de circonstances ou l’exemple à suivre?, Sébastian Weissenberger
- Développement des techniques spatiales de cartographie du potentiel éolien offshore et côtier par imagerie radarsat: cas du golfe du St-Laurent, Julien Choissard, Gaëtan Lafrance et Monique Bernier
- Les dynamiques sociales engendrées par l’implantation du parc éolien Le Nordais, Étienne Lyrette et Michel Trépanier
- L’électrification rurale décentralisée dans le sud, Nadia Bentaleb
- Énergie : réenchaîner Prométhée ? Une approche conceptuelle, Fabrice Flipo
- Protocole de Kyoto : Le cas du secteur résidentiel au Canada?, Gaëtan Lafrance, Julien Genoïs et Martin Lemay
- La révolution électrique en cours : portrait de l’émergence d’une nouvelle architecture dans les pays industrialisés, Philip U. Dunsky
- Modèle d’accrétion de glace sur un objet bidimensionnel fixe applicable aux pales d’éolines, Guy Fortin, Adrian Ilinca et Jean-Louis Laforte

### J’ai lu

Les nouveaux utopistes du développement durable - Collectif sous la direction de Anne-Marie Ducroux; Amphibiens et reptiles du Québec et des maritimes - Jean-françois Desroches et David Rodrigue; Les batailles de l’eau : pour un bien commun de l’humanité - Mohamed Larbi Bouguerra

Les articles n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement la position de la revue VertigO, de son comité de rédaction, de son comité scientifique ou de ses partenaires.

La revue VertigO est appuyée financièrement par la Corporation I.C.I. environnement.



## Équipe de rédaction

### Directeur de la publication Rédacteur en Chef

Éric Duchemin, Ph.D

### Rédactrice-adjointe

Sophie Hamel-Dufour, MSc, Rédactrice-adjointe

### Comité scientifique

P. Côté, Université du Québec à Rimouski, Canada  
P. Crabbé, Université d'Ottawa, Canada  
L. Guay, Université Laval, Canada  
P. Houenou, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire,  
Y. Leblanc, Journaliste, Canada  
S. Lepage, Environnement Canada, la Biosphère, Canada  
M. Lucotte, Université du Québec à Montréal, Canada  
M. Richard, Régie Régionale de la Santé, Canada  
M.P. Sassine, Régie régionale de la Santé, Canada  
J.G. Vaillancourt, Université de Montréal, Canada  
J. Vien, Université de Sherbrooke, Canada  
B. Zuindeau, Université de Lille-1, France.

### Comité de rédaction

Martin Girard, MSc.  
Steve Déry, PhD  
Mathias De Kouassi, PhD  
Mireille Genest, MSc  
Sebastian Weissenberger, MSc.

### Concepteur WEB

P. Cayer

### Pour rejoindre la rédaction

VertigO  
2669 Knox  
Montréal (Québec)  
H3K 1R3, Canada  
courriel: [vertigoweb@sympatico.ca](mailto:vertigoweb@sympatico.ca)  
Internet: <http://www.vertigo.uqam.ca>

© Les Éditions en Environnement -VertigO  
Dépôt à la Bibliothèque Nationale du Canada  
ISSN – 1492 - 8442

Quant aux habitants de ces quartiers, trop souvent ils ne peuvent s'inscrire dans la mouvance d'emplois, de démarrage d'entreprise et de revitalisation qui s'ébranle à proximité d'eux. Ce phénomène existe également pour le développement en région éloignée des grands centres, lorsque les besoins en main-d'œuvre «à la fine pointe de connaissances» laissent de côté les travailleurs locaux au profit des spécialistes de la ville. Par conséquent, afin que les retombées sociales, économiques, voire environnementales de ces projets puissent profiter à tous, les administrations municipales se doivent d'utiliser judicieusement les différentes formes de processus de participation du public qui s'offrent à elles. Dans cette perspective, la consultation en amont du développement, ou mieux du «redéveloppement» devrait être à la base de la planification urbaine. Voyons un peu ce que nous apprend l'histoire suivante.

Il y a quelques semaines, la Société du Havre, corporation de développement montréalaise a déposé son plan de développement pour une grande zone au sud de la ville de Montréal en bordure de l'eau<sup>1</sup>. Le but affiché de ce projet est de développer des friches industrielles, un but louable en soit. Les plans de développement présenté sont beaux et vertueux. On plante des arbres, on redonne l'accès au fleuve, on permet la création de logement, et d'emplois. Sur papier tout va pour le mieux. Cependant, au passage du développement on fait main basse sur des sections de quartiers et des terrains que certains aimeraient utiliser pour un développement local, on axe le développement vers le centre de la ville laissant en plan les quartiers périphériques. En effet, le tramway prévu dans le projet se dirigera du centre touristique de la ville vers le nouveau développement, sans jamais se rendre dans les quartiers limitrophes et moins nantis. Une grande zone rattachée depuis des siècles à l'économie de ces quartiers sera développée pour accueillir des événements de grande envergure. On sacrifie ainsi un pan entier du patrimoine de ce secteur. En dictateur éclairé on dicte ce qui est bon pour les citoyens. Qui de cette corporation vit dans la zone touchée par la proposition de «redéveloppement»? Dans quelle mesure ce projet illustre une volonté de maintenir et de développer le tissu social du secteur au sein duquel il s'implantera? Sans consultation des collectivités locales, le risque est grand de reproduire des exclusions dans des quartiers qui n'ont pas besoin de se sentir davantage marginalisés qu'ils ne le sont dans leur réalité urbaine.

Afin de faire entendre la voix de collectivités locales au chapitre, la table de concertation communautaire Action-Gardien de Pointe St-Charles (un des quartiers touchés par la proposition de développement) organise une opération populaire d'aménagement où les citoyens sont invités à rêver leur quartier et à proposer des projets concrets d'aménagement qui répondent à leurs besoins. Cet événement a un intérêt évident pour

<sup>1</sup> Vous trouverez toutes les informations relatives à ce projet à l'adresse Internet suivante : ([http://www.havremontreal.qc.ca/fr/publications/ville\\_fleuve.htm](http://www.havremontreal.qc.ca/fr/publications/ville_fleuve.htm)).

l'évolution de la consultation publique car elle représente un processus de décision ascendant (bottom-up). Les citoyens élaboreront, avec l'aide d'urbanistes et d'architecte, des solutions pour un développement local de leur communauté. Il faut espérer que ce type de projet de consultation ascendant devient une réalité dans le mode de consultation et non une exception. En attendant le déroulement de cette consultation au début juin, il ne reste qu'à rêver des villes citoyennes<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Voir Janet Biehl, Le municipalisme libertaire, Éditions écosociété, 1998, 299 p.

# PRÉVENIR LES CONFLITS ET PROMOUVOIR LA COOPERATION DANS LA GESTION DES FLEUVES TRANSFRONTALIERS EN AFRIQUE DE L'OUEST

Madiodio Niasse, Dr , Coordonnateur Régional, Zones Humides et Ressources en Eau, Bureau Régional pour l'Afrique de l'Ouest de l'Union mondiale pour la nature (UICN-BRAO), 01 B.P. 1618 Ouagadougou 01, Burkina Faso, Tel:++226-50328500; Fax:++226-50307561,

Courriel: [madiodio.niasse@iucn.org](mailto:madiodio.niasse@iucn.org)

---

**Résumé :** La multiplication des projets de grands barrages, le haut degré d'interdépendance des pays en matière d'eau et la réduction drastique de la disponibilité de cette ressource —notamment du fait de la variabilité et du changement climatique— ont augmenté de façon notable les risques de conflits internationaux autour de l'eau en Afrique de l'Ouest. Dans un tel contexte, la gestion des 25 cours d'eau transfrontaliers que compte cette région est un véritable défi. Après avoir rappelé certaines des tensions et crises plus ou moins sévères autour de l'eau que la région a enregistré au cours des dernières années, cet article analyse le dispositif de gestion des conflits de l'eau et de coopération à l'échelle des bassins fluviaux, avec un accent particulier sur les différences entre modèles d'organisation de bassin frontaliers et transfrontaliers. Il rappelle aussi les dispositions pertinentes du droit international et les normes émergentes de bonne conduite dans la gestion des cours d'eau partagés. Enfin, cet article formule des éléments d'orientation qui permettent de faire des cours d'eau transfrontaliers des espaces de coopération plutôt que des lieux de conflits et de tensions.

**Mots clés :** cours d'eau transfrontaliers ; organisation de bassin ; conflits de l'eau ; barrages ; coopération régionale ; accords internationaux

**Abstract:** The growing number of planned large dams, the high level of water interdependency among countries and the drastic reduction in water availability—in particular as a result of climate variability and change— have notably increased the risks of international water conflicts in West Africa. In such a context, the management of the region's 25 transboundary watercourses is a real challenge. After having described some of the tensions and crises experienced in recent years, this article analyses the basin-level mechanisms for conflict management and for cooperation, with specific emphasis on the differences between boundary and transboundary river basin organization models. It also recalls some of the relevant provisions in international law and the emerging norms of good conduct in the management of shared watercourses. Finally, this article makes key suggestions which would make transboundary watercourses spaces for cooperation instead of fields of conflicts and tensions.

**Key words:** transboundary watercourses; basin organization; water conflicts; dams; regional cooperation; international agreements

---

## Introduction

Beaucoup d'études au cours des dernières années montrent qu'historiquement peu de tensions et disputes autour de l'eau ont débouché sur des conflits armés ouverts, c'est-à-dire des «guerres de l'eau» (Wolf, 2001 ; Postel & Wolf, 2001 ; Turton, 2000 ; Wolf et al, 2003). Les travaux effectués par l'Université d'Etat de l'Oregon sur les conflits et la coopération dans les bassins fluviaux internationaux montrent que jusqu'ici les relations entre pays riverains d'un fleuve international peuvent être tendues, des disputes peuvent survenir, mais que de façon générale ces pays en arrivent presque toujours à trouver une formule de coopération plutôt qu'à opter pour la confrontation ouverte (Wolf, 2001 ; Wolf et al. 2003). Cela dit, avec la pression de plus en plus accentuée sur les ressources en eau (du fait de l'accroissement de la demande) et de la réduction de la disponibilité de la ressources

(suite à la variabilité et au changement climatique), beaucoup s'attendent à la multiplication des disputes autour de l'eau, lesquelles disputes peuvent mener à la tension régionale voire déboucher sur des conflits régionaux coûteux (Postel et Wolf, 2001). Avec la compétition grandissante autour de l'eau en Afrique, Ashton (2002) pense que les conflits de l'eau y deviennent inévitables et pourraient mettre en cause la stabilité régionale, à moins que les dispositions appropriées soient prises pour les prévenir. L'Afrique de l'Ouest même n'est pas épargnée : parmi les 17 bassins fluviaux identifiés à l'échelle globale comme des zones à haut risque (c'est-à-dire des bassins où les conditions sont mûres pour que surviennent des tensions politiques et des conflits), 8 sont en Afrique dont 2 en Afrique de l'Ouest : le fleuve Sénégal et le bassin du lac Tchad (Postel et Wolf, 2001 ; Wolf et al, 2003).

À la racine de beaucoup des tensions et disputes autour de l'eau, on trouve souvent deux séries de facteurs : (a) un changement rapide et profond dans les conditions physiques du cours d'eau, par exemple à partir de la construction de barrages, la diversion de l'eau ou la réalisation de périmètres d'irrigation ; (b) l'incapacité des institutions existantes à absorber et gérer de façon efficace lesdits changements, par exemple à travers des organisations de bassin ou des accords de coopération (Postel et Wolf, 2001).

Ces deux facteurs semblent être à l'œuvre dans beaucoup de bassins fluviaux de l'Afrique de l'Ouest, faisant donc de cette région une zone à haut risque de conflits de l'eau, à moins que les mesures appropriées soient prises à temps pour les prévenir. Cet article répond à ce besoin. Il constitue une contribution à l'analyse des défis qui se posent dans la gestion des cours d'eau transfrontaliers en Afrique de l'Ouest. Après une brève présentation du contexte régional, nous décrivons certaines des disputes et tensions enregistrées autour de bassins internationaux ces dernières années. Ensuite, nous formulons des pistes de réflexion pour que les eaux partagées de la région soient des espaces de coopération et de promotion de l'intégration régionale plutôt que des lieux de conflits et de tensions.

### Contexte régional ouest-africain : pression croissante sur des ressources en eau douces souvent partagées

L'Afrique de l'Ouest —définie ici comme étant la région couvrant le Sahel et l'espace de la Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest— comprend 17 pays et s'étend sur 7.500.000 km<sup>2</sup> pour une population de 250 millions d'habitants. L'Afrique de l'Ouest est une région très contrastée du point de vue pluviométrique, avec une nette opposition entre régions bien arrosées et régions arides. Mais ce contraste est fortement atténué par la configuration du réseau hydrographique. Les principaux cours d'eau de la région (Niger, Sénégal, Gambie, réseau du lac Tchad) prennent leur source dans des régions bien arrosées avant de traverser les zones sahéliennes où les déficits pluviométriques sont chroniques depuis le début des années 1970. Ces cours d'eau permettent un transfert inter-zonal d'eau douce des régions humides vers les régions arides, créant ainsi une forte interdépendance des pays ouest-africains en ce qui concerne l'utilisation et la gestion des ressources en eau douce.

#### *Forte inter-dépendance des Etats de l'Afrique de l'Ouest en matière d'eau*

Bien que couvrant moins du quart de la superficie du continent africain, l'Afrique de l'Ouest concentre 25 bassins fluviaux transfrontaliers (figure 1 et tableau 1), soit un peu moins de la moitié des quelques 60 cours d'eau internationaux que compte l'Afrique. Parmi ces bassins, les principaux sont le Niger (partagés entre 11 pays si on prend en compte aussi bien la partie active que celle non active du bassin), le Sénégal (4 pays), la Volta (6 pays), le lac Tchad (8 pays), la Comoé (4 pays), etc. Ainsi à l'exception du Cap Vert, chacun des pays de la région

partage au moins un cours d'eau international. Les pays ont généralement un facteur de dépendance supérieur à 40% : le facteur de dépendance représente la part totale de ressources renouvelables en eau du pays produite à l'extérieur de ses frontières. A noter que des pays tels que le Niger et la Mauritanie ont des facteurs de dépendance de l'ordre de 90%.



Figure 1. Bassins fluviaux transfrontaliers de l'Afrique de l'Ouest

#### *Une pression accrue sur les ressources en eau douce*

Le niveau actuel de prélèvement d'eau douce dans la région ouest-africaine ne représente pour le moment qu'une faible proportion (moins de 2 %) des disponibilités totales de la région en ressources renouvelables (plus de 1000 milliards de m<sup>3</sup>). Cependant si les tendances actuelles se maintiennent, ce niveau devrait être quintuplé d'ici 2025 (GWP, 2000). Si l'Afrique de l'Ouest devait réaliser ses ambitions de développement, la pression sur les ressources en eau devrait être encore plus grande.

Si les variations du climat observées ces dernières décennies devaient se maintenir, on devrait assister à la diminution de l'eau disponible dans les fleuves et lacs de la région. Par rapport aux décennies antérieures, on observe que depuis le début des années 1970, la pluviométrie moyenne annuelle a baissé de 10% dans la zone tropicale humide à plus de 30% dans le Sahel (figure 2), et le débit moyen des grands fleuves de la région a diminué de 40 à 60% (Mahé et Olivry, 1995 ; Servat et al., 1997 ; Paturel et al., 1997). Cette baisse générale de la disponibilité de l'eau se déroule dans un contexte marqué par la persistance d'une grande fréquence des extrêmes climatiques qui voient se succéder les années de grande sécheresse à celles où prévalent des pluies dévastatrices (Oyebande et al, 2002 ; Niasse et al, 2003).

Bassin	Superficie (km <sup>2</sup> )	Nombre de pays riverains et leur partie du bassin en km <sup>2</sup>
1. Sénégal	436 000	4 Mauritanie (219 100) ; Mali (150 800) ; Sénégal (35 200) ; Guinée (30 800)
2. Gambie	69 900	3 Sénégal (50 700) ; Guinée (13 200) ; Gambie (5 900)
3. Rio Geba	12 800	3 Guinée-Bissau (8 700) ; Sénégal (4 100) ; Guinée (50)
4. Rio Corubal	24 000	2 Guinée (17 500) ; Guinée-Bissau (6 500)
5. Great Scarcies	12 100	2 Guinée (9 000) , Sierra Leone (3 000)
6. Little Scarcies	18 900	2 Sierra Leone (13 000) ; Guinée (5 900)
7. Moa	22 500	3 Sierra Leone (10 800) ; Guinée (8 800) ; Libéria (2900)
8. Mana-Morro	6 900	2 Sierra Leone (1 200) ; Liberia (5 700)
9. Loffa	11 400	2 Liberia (10 100) ; Guinée (1 300)
10. Saint-Paul	21 200	2 Liberia (11 800) ; Guinée (9 400)
11. Saint John	15 600	2 Liberia (13 000) ; Guinée (2 600)
12. Cestos	15 000	3 Liberia (16 600) ; Côte d'Ivoire (2 200) ; Guinée (9 400)
13. Cavally	30 600	3 Côte d'Ivoire (16 600) ; Liberia (12 700) ; Guinée (1 300)
14. Sassandra	68 200	2 Côte d'Ivoire (59 800) ; Guinée (8 400)
15. Comoé	78 100	4 Côte d'Ivoire (58 300) ; Burkina Faso (16 900) ; Ghana (2 200) ; Mali (700)
16. Bia	11 100	2 Ghana (6 500) ; Côte d'Ivoire (4 600)
17. Tanoé	15 600	2 Ghana (13 800) ; Côte d'Ivoire (1 800)
18. Volta	412 800	6 Burkina Faso (173500) ; Ghana (166000) ; Togo (25800) ; Mali (18800) ; Bénin (15000) ; Côte d'Ivoire (13500)
19. Mono	23 400	2 Togo (22 300) ; Bénin (1 100)
20. Oueme	59 500	3 Bénin (49 400) ; Nigeria (9700) ; Togo (400)
21. Niger	2 113 200	11 Nigeria (561900) ; Mali (540700) ; Niger (497900) ; l'Algérie* (161300) ; Guinée (95900) ; Cameroun* (88100) ; Burkina Faso (82900) ; Bénin (45300) ; Côte d'Ivoire (22900) ; Tchad (16400) ; Sierra Leone (50)
22. Cross	52 800	2 Nigeria (40300) ; Cameroun* (12500)
23. Akpa Yafi	4 900	2 Cameroun* (3 000) Nigeria (1 900)
24. Lac Tchad	2 388 700	Tchad (1079200) ; Niger (674200) ; République Centrafricaine* (218600) ; Nigeria (180200) ; Algérie* (90000) ; Soudan* (82800) ; Cameroun* (46800) ; Partie Tchad revendiquée par Libye* (12300) ; Libye* (4600)
25. Atui	32600	2 Mauritanie (20500) ; Sahara occidental (12100)*

Tableau 1. Les bassins fluviaux partagés de la sous-région Afrique de l'Ouest. \* Pays riverains ne faisant pas partie de l'Afrique de l'Ouest (espaces CEDEAO et/ou CILSS). Sources : Global International Waters Assessment ([www.giwa.net](http://www.giwa.net)); Transboundary Freshwater Database. Oregon University : [www.transboundarywaters.orst.edu/publications/register/tables/IRB\\_africa.html](http://www.transboundarywaters.orst.edu/publications/register/tables/IRB_africa.html). Oct 2002

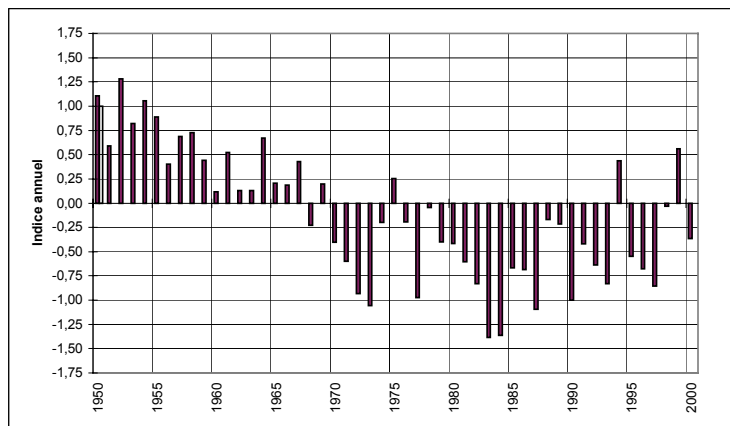


Figure 2. Évolution de la pluviométrie dans le Sahel (1950-2000). D'après L'Hôte et al., 2002)

En réponse à ce contexte hydro-climatique particulier et comme manifestation de la pression grandissante sur les ressources en eau, on a assisté ces dernières décennies à un accroissement notable des grands barrages dont le nombre est aujourd'hui estimé à près de 110 dans la région<sup>1</sup>. Plus significatif encore, les projets de grands barrages existent à foison. Rien que sur le fleuve Niger, une vingtaine de sites de grands barrages sont identifiés et sont à des étapes plus ou moins avancées de planification. Parmi ces projets de barrages, on peut noter : Fomi et Kamarato en Guinée ; Kénié, Tossaye et Labezanga au Mali ; Dyodyonga et Gambou entre le Bénin et le Niger ; Kandadji pour le Niger ; Lokoja, Makurdi, Onistha pour le Nigeria. Des pays tels que la Guinée ou le Bénin comptent chacun quatre à cinq projets de grands barrages qu'ils espèrent réaliser dans les prochaines années.

En permettant de stocker l'eau douce pendant les saisons et les années excédentaires afin de la rendre disponible lors que cela est nécessaire, les barrages sont des outils efficaces pour lutter contre les pénuries d'eau et le caractère souvent aléatoire de sa distribution dans le temps et dans l'espace. Mais ce faisant, les barrages affectent les modalités d'accès à l'eau et aux ressources qui en dépendent, ceci à l'avantage de certains usagers de l'eau (à des fins de consommation domestique ou pour l'irrigation) et des produits et services dérivés de sa transformation (électricité, navigation). Ainsi le processus d'allocation et de ré-allocation de

<sup>1</sup> Un grand barrage est défini par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) comme étant un barrage d'une hauteur supérieure à 15 m. Les barrages ayant 10 à 15 m de haut avec une longueur en crête supérieure à 500 m, ou pouvant stocker plus de 1 hm<sup>3</sup> d'eau, ou dont l'évacuateur de crue a une capacité de plus 2 000 m<sup>3</sup>/s sont aussi considérés comme des grands barrages. ([www.icold-cigb.org/chartefr.html](http://www.icold-cigb.org/chartefr.html)).

ressources par les barrages peut contribuer à la lutte contre la pauvreté et au progrès social et économique (Adams et al. 2000 ; Niasse, 2002). Dans beaucoup de cas cependant, cette ré-allocation revêt la forme d'un «transfert» de ressources —transfert qui ne nécessite pas toujours une dérivation physiquement observable de l'eau. Par exemple la construction d'un barrage peut entraîner la baisse de la disponibilité de poisson en aval au profit du réservoir de barrage et des parties amont. Le barrage peut aussi permettre de transformer les services que rend l'eau (production agricole, pêche) à une communauté donnée en d'autres types de services (production d'électricité, expansion de terres irriguées) au profit d'autres groupes de populations pouvant vivre ailleurs dans le bassin ou même en dehors du bassin. On constate ainsi qu'un barrage peut enlever du domaine productif d'un Etat ou de groupes donnés l'eau et les ressources foncières auxquelles elle est associée afin de les mettre à la disposition d'un autre Etat et d'autres groupes de populations (Niasse, 2002 ; Adam, 2000).

La multiplication des barrages accroît la pression sur les ressources en eau —ce qui se traduit notamment par l'augmentation du niveau de prélèvement des ressources eau et par l'altération de la qualité des eaux du fait de l'accroissement de la fragmentation des fleuves. Cette fragmentation —interruption de l'écoulement naturel d'un fleuve par des barrages, des transferts inter-bassins ou des prélèvements d'eau— est un indicateur du degré de modification par l'homme des cours d'eau (Ravenga et al., 2000). Les impacts des barrages sur l'environnement naturel des cours d'eau sur lesquels ils sont construits sont souvent importants : perturbation de la migration des poissons le long du fleuve et entre celui et la mer, destruction d'habitats naturels et de lieux de reproduction d'espèces telles que les oiseaux d'eau, ralentissement de la vitesse des écoulements, changement de la charge sédimentaire de l'eau et de sa température, modification de l'écologie des zones côtières et deltaïques, etc. (Ravenga et al, 2000 ; WCD, 2000).

A cause de ces impacts sociaux, économiques et environnementaux, les barrages sont souvent à l'origine de beaucoup des disputes et tensions autour de l'eau, s'ils ne servent d'étincelle pour des conflits dormants (Postel & Wolf, 2001). En Afrique de l'Ouest, beaucoup de pays se sont engagés, souvent de façon unilatérale dans des programmes de grands barrages. Il n'est donc pas surprenant que l'on y note une série de disputes et tensions inter-étatiques plus ou moins sévères.

### Multiplication des risques de conflits liés à l'eau

La multiplication des projets de grands barrages, le haut degré d'interdépendance des pays ouest-africains en matière d'eau, et la réduction notable de la disponibilité de l'eau créent un terrain propice à la tension voire aux risques de conflits inter-étatiques autour de la ressource en eau en Afrique de l'Ouest. Nous décrivons ci-dessous des exemples de crises ouvertes ou larvées et de risques de conflits.

*Sénégal vs Mauritanie*

C'est lors du dernier trimestre de l'année 1988 qu'a commencé ce qui allait mener quelques mois plus tard à la plus grave crise dans les relations entre le Sénégal et la Mauritanie. Le barrage de Manantali venait d'être réceptionné alors que celui Diama était mis en service deux ans auparavant. Des expulsions d'agropasteurs de part et d'autre des deux pays déboucha très vite sur l'exhumation d'un vieux litige foncier relatif au tracé de la frontière entre les deux pays. Après des tueries et prises d'otages localisées, la tension ne tarda pas à gagner tout le long du fleuve et les principales villes des deux pays. Le bilan du conflit sera lourd : outre des dizaines de morts, près de 75.000 sénégalais et 150.000 mauritaniens durent être rapatriés au courant du premier semestre de 1989 (Magistro, 1993 ; Horowitz, 1989 ; Parker, 1989). Des milliers de noirs se réclamant de la nationalité mauritanienne furent déportés au Sénégal. On a même noté des échanges de tirs d'artillerie lourde entre les armées des deux pays déployées de part et d'autre du fleuve (Magistro, 1993, Parker, 1989). Malgré le rétablissement en 1992 des relations diplomatiques entre les deux pays —relations diplomatiques rompues trois ans auparavant— les blessures occasionnées par la crise prendront plus de temps pour se cicatriser. Depuis lors, « l'épaississement de la frontière »<sup>2</sup> persiste, et a radicalement changé le statut et le rôle du fleuve aux yeux des milliers d'agriculteurs transfrontaliers vivant de part et d'autre du fleuve. Le nombre de ceux-ci était estimé à 37.000 au milieu des années 1970, avec 21% résidant sur la rive droite (Mauritanie) et 79% sur la rive gauche (Sénégal) (Seck, 1991).

Des événements récents illustrent le caractère précaire de l'accalmie qui semble régner dans la moyenne vallée du Sénégal depuis 1992. En juin 2000, les autorités mauritaniennes accusèrent —non sans raison d'ailleurs— le Président Wade du Sénégal qui venait d'être élu d'avoir l'intention de remettre à l'ordre du jour le Projet de réhabilitation de vallées fossiles de son prédécesseur. Ce projet consiste à dévier une partie de l'eau du fleuve Sénégal pour alimenter un réseau de vallées asséchées dans le centre-nord du Sénégal. Du point de vue des dirigeants politiques sénégalais, la remise en eau de ce réseau de cours d'eau fossiles — en particulier la vallée du Ferlo qui se jette dans le lac de Guiers à Keur Momar Sarr après avoir reçu une série d'affluents tous aujourd'hui asséchés— permettrait de développer les activités agro-pastorales dans la région sahélienne du centre-nord du Sénégal. La réalisation de ce projet allait entraîner une réduction importante du niveau des débits dans la section aval du fleuve, c'est-à-dire celle qui est frontalière entre le Sénégal et la Mauritanie —la ré-inondation des vallées sèches se faisant par des transferts d'eau à partir de la section amont du fleuve frontalière entre le Sénégal et le Mali. La réaction du gouvernement mauritanien à ce projet fut de donner un délai de

15 jours aux ressortissants sénégalais pour quitter la Mauritanie. Le Président Wade annonça alors le gel du projet, ce qui fit baisser la tension<sup>3</sup>, en attendant le prochain incident.

*Ghana vs Burkina Faso*

Lors de la crise énergétique qui avait frappé le Ghana en 1998, suite au déficit d'eau dans le Lac Volta (lac qui constitue aussi le réservoir du barrage hydroélectrique d'Akosombo), une partie de l'opinion publique et même des dirigeants de ce pays avaient suspecté le Burkina d'avoir été à l'origine du problème. Certains ont en effet pensé que la baisse du niveau d'eau dans le Lac Volta résultait d'un accroissement des prélèvements d'eau par le Burkina sur les sections amont de la Volta Blanche et de la Volta Noire —ces deux affluents contribuant pour 56% dans les apports d'eau au Lac Volta en année d'hydraulicité moyenne. Cette thèse semblait d'autant plus plausible qu'entre la fin des années 1960 et le milieu des années 1990, le Burkina avait aménagé 1500 petites retenues d'eau (Fourd, 2002), construit 3 grands barrages et augmenté ses superficies irriguées de 2000 ha à 25.000 ha dans le haut bassin de la Volta<sup>4</sup>. Mais les analyses ont montré que la capacité totale de stockage d'eau de l'ensemble des petits et grands barrages du Burkina et même en y ajoutant trois autres projets de grands barrages ne représentait que 1,49 milliards de m<sup>3</sup>, soit moins de 5% du volume d'eau normal du lac Volta (Andreini et al, 2000) ; van de Giesen, 2001). Il y a donc une autre explication plus plausible des déficits d'eau dans le lac Volta. La cause la plus crédible de crise énergétique semble être la variabilité et le changement climatique.

*Bénin vs Niger*

Le différend qui oppose ces deux pays concernant l'appartenance de l'île de Lété sur le fleuve Niger date du début des années 1960. L'île de Lété est un lieu de rencontre entre pasteurs nomades nigériens qui y séjournent de façon saisonnière et agriculteurs sédentaires béninois. Dans les années récentes, certainement en rapport avec les perspectives de valorisation de leurs eaux partagées, le Bénin et le Niger ont senti la nécessité de mettre fin à l'ambiguïté du tracé de leurs frontières le long du fleuve Niger —où est prévu le barrage de Gambou— et du fleuve Mékrou (affluent du fleuve Niger)—où est prévu le barrage de Dyodyonga. Les deux pays ont même signé récemment un accord de coopération pour la construction de ce dernier barrage (voir ci-dessous). Le règlement de ce litige frontalier est pendant devant la Cour Internationale de Justice depuis mai 2002.

*Nigeria vs Niger*

Le Nigeria qui a consenti d'énormes investissements hydro-agricoles et énergétiques dans la partie aval du fleuve Niger (grands barrages de Kainji et de Jebba, 1,6 millions d'hectares de périmètres irrigués, aménagements pour transport fluvial, et

<sup>2</sup> Expression empruntée de Seck, S. M. 1991.

<sup>3</sup> Voir: [www.irc.nl/source/weekly/00223.html#senegal-mauritania](http://www.irc.nl/source/weekly/00223.html#senegal-mauritania)

<sup>4</sup> Source: [www.glowa-volta.de/cd\\_v3.1/index.htm](http://www.glowa-volta.de/cd_v3.1/index.htm)



approvisionnement en eau des villes) redoute aujourd'hui que la réalisation de projets de barrages en amont du fleuve n'entraîne une baisse des débits dans la partie nigériane du cours d'eau.

C'est ainsi que les autorités nigérianes ont manifesté à plusieurs reprises leur inquiétude concernant tout projet hydraulique sur le fleuve Niger qui entraînerait une réduction de plus de 10% du volume d'eau annuel reçu au Nigeria : les projets visés sont le barrage de Kandadji au Niger et dans une moindre mesure celui de Tossaye au Mali (ABN, 2002). Au regard de la variabilité passée (baisse de 20 à 50% des écoulements moyens) et prévisibles du climat, on peut se demander si la variabilité et le changement climatiques ne vont pas «prélever» plus d'eau du fleuve Niger que les pays situés en aval (le Nigeria en l'occurrence) ne le jugeraient acceptable (figure 3). Il est même à craindre qu'il y ait méprise et que l'on en arrive à accuser les aménagements en amont pour ce qui relèverait des variations climatiques.

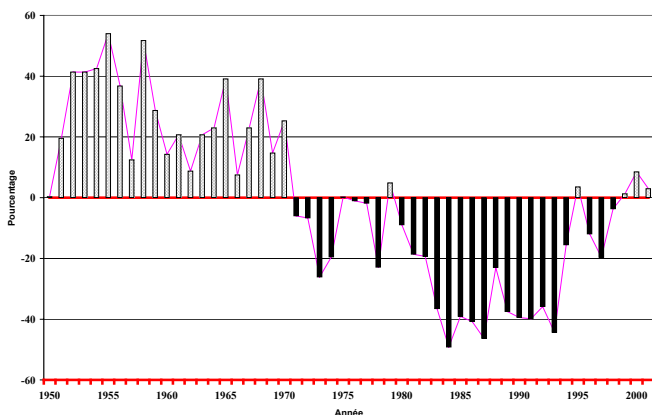


Figure 3 : Débits annuels du fleuve Niger à Niamey : écarts à la moyenne 1950-2001 (Niasse et al 2003)

#### *Cameroun vs Nigeria à propos du Lac Tchad*

Une dispute a récemment opposé le Cameroun au Nigeria à propos d'une partie de la zone du lac Tchad, en particulier la localité de Darak et les villages environnants. Darak —situé en territoire camerounais à 35 km à l'est de la frontière avec le Nigeria— aurait été créé vers 1987 par des pêcheurs Nigériens ayant suivi la retraite progressive des eaux du lac avec la succession des années de faible pluviométrie et de baisse marquée des apports des affluents du lac (figure 4). La superficie maximum inondée du lac Tchad a ainsi baissé de 37000 km<sup>2</sup> au début des années 1950 à 15000 km<sup>2</sup> au début des années 1990 pendant que la superficie inondée pendant 4 mois consécutifs baissait de 23000 à 2000 km<sup>2</sup> au cours de la même période. Au milieu des années 1990, on comptait dans la partie camerounaise du lac plus de 30 villages créés par des immigrants Nigériens

totalisant une population de plus de 70000 habitants (IRIN News.2003a). La tension entre les deux pays résulta directement du fait que l'administration nigériane a suivi l'émigration de ses ressortissants, en étendant donc en territoire camerounais l'exercice de l'Etat du Nigeria (occupation militaire, expansion du service public avec création d'écoles et de postes de santé, etc...). Il s'y ajoute que les villages d'immigrants furent intégrés dans les administrations et collectivités décentralisées du Nigeria —les localités en question furent incorporés dans le District nigérian de Wulgo, dans l'unité de gouvernement local de Ngala, Etat du Borno<sup>5</sup>. Après de multiples incidents militaires entre les années 1980 et les années 1990, les deux pays cherchèrent sans succès à trouver une solution de leur différend dans le cadre de la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT). En 1994, ils portèrent le différend devant la Cour Internationale de Justice, en en faisant une des composantes du différend frontalier entre les deux Etats et concernant leurs frontières aussi bien maritimes que continentales<sup>6</sup>. C'est en octobre 2002 que la Cour internationale de Justice rendit son verdict, ceci en faveur du Cameroun. Et depuis décembre 2003, le Nigeria a commencé à se retirer du territoire disputé (IRIN, 2003b).

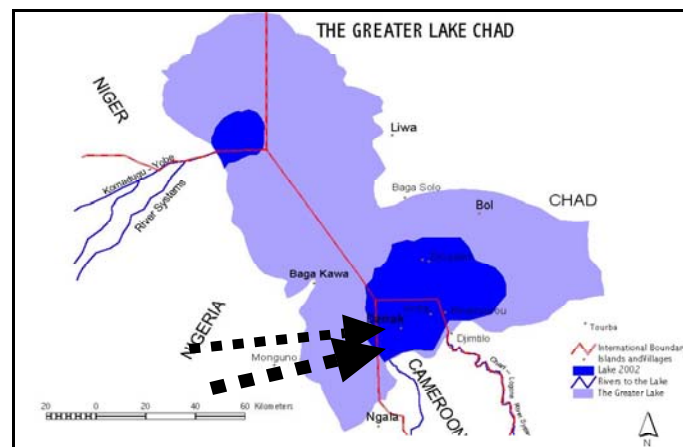


Figure 4. Migration de pêcheurs nigériens vers la partie camerounaise du Lac Tchad (D'après fonds de carte CBLT/LCBC Remote Sensing Unit. Mai 2002)

<sup>5</sup> Cour Internationale de Justice : <http://212.153.43.18/cijwww/cdoCKET/ccn/cnframe.htm>

<sup>6</sup> *Le Messenger* No.1425 daté Oct 11, 2002 Entrevue de Douala Moutomè : *Nous sommes allés à la Haye avec la certitude que c'est là que viendrait la solution.* (Source : [www.wagne.net/messenger/messenger/1425/messenger.html](http://www.wagne.net/messenger/messenger/1425/messenger.html))

*Caractéristiques communes des conflits de l'eau en Afrique de l'Ouest*

Les observations générales suivantes peuvent être faites sur les risques de conflits qui viennent d'être décrits.

i. La construction d'ouvrages de maîtrise de l'eau pousse les Etats riverains à vouloir «marquer leur territoire», chacun essayant de contrôler la plus grande portion possible des terres valorisées par les barrages (conflit Sénégal-Mauritanie ; différend frontalier Bénin-Niger) ;

ii. Dans l'ignorance totale des enjeux nouveaux créés par la réalisations d'infrastructures hydro-agricoles, les populations tendent à maintenir leurs propres habitudes migratoires et leurs modes traditionnels d'utilisation et de gestion transfrontalières des ressources foncières. Tant que des enjeux nouveaux ne sont pas créés soit par de fortes baisses de disponibilité de l'eau ou par des investissements hydro-agricoles, les Etats tendent à fermer les yeux (fleuve Sénégal ; zones litigieuse entre le Bénin et le Niger ; sud du Lac Tchad).

iii. Pour faire accepter leur souveraineté sur les terres objet de litiges, certains Etats évoquent tantôt les conventions internationales (notamment celles de l'OUA concernant l'intangibilité des frontières héritées de la colonisation), tantôt les convention concernant les organisations de bassins (OMVS en ce qui concerne le conflit Sénégal-Mauritanie, CBLT en ce qui concerne la dispute entre le Nigeria et le Cameroun). D'autres Etats s'appuient sur les coutumes et pratiques foncières traditionnelles (Sénégal face à Mauritanie ; Nigeria face au Cameroun). On notera que dans les deux cas, le droit moderne, positif, a prévalu sur le droit coutumier.

iv. Les impacts avérés ou anticipés de barrages réalisés ou envisagés dans un pays amont sont souvent à la source des tensions entre Etats riverains (Burkina sur le Ghana ; Niger sur le Nigeria). Ces impacts peuvent se poser en termes d'augmentation du niveau de prélèvement (et donc de baisse des débits en aval) ou de changement de la qualité de l'eau (température, turbidité, facteur de prolifération d'espèces envahissantes). Il est à noter que dans la plupart des cas, les pays amont incriminés tendent à nier ou à minimiser leurs responsabilités (Burkina ; Niger).

v. Dans certains cas, les organisations de bassin existantes ont joué un rôle important de gestion de la crise. L'OMVS par exemple a continué à fonctionner tout au long de la crise entre le Sénégal et la Mauritanie, et lors de la période de rupture des relations diplomatiques entre les deux pays en servant de cadre de dialogue entre les deux pays, ce qui a été pour beaucoup dans la baisse progressive de la tension. De même, cette structure a servi de cadre d'arbitrage lors de la crise récente sur la réinondation des vallées fossiles du Sénégal. La CBLT a eu à servir comme premier niveau d'arbitrage entre le Cameroun et le

Nigeria à propos du Sud du lac Tchad. Les premiers travaux de bornage de la frontière entre les deux pays dans la zone du lac Tchad ont été effectués par la CBLT. L'ABN continue de servir de cadre de dialogue entre le Mali et le Niger d'une part (à propos du projet de barrage de Tossaye) et le Niger et le Nigeria d'autre part (à propos du projet de barrage de Kandadji). On peut aussi évoquer le travail de facilitation du dialogue entre le Cameroun et le Nigeria sur le fleuve Bénoué (un des affluents du fleuve Niger)<sup>7</sup>.

Pour le moment, on peut se réjouir qu'aucune des crises autour de l'eau enregistrées en Afrique de l'Ouest n'a débouché sur une confrontation militaire ouverte. Mais on peut aussi se demander jusqu'à quand cela peut durer, surtout si la pression sur les ressources en eau devait s'accroître, notamment par l'accroissement de la demande, la réalisation des nombreux projets de grands barrages, et la poursuite de la dégradation des conditions hydro-climatiques.

Face à de tels défis, il est important que la région renforce sa capacité de prévention et de résolution des conflits et donc de promotion de la concertation, notamment autour de la gestion des cours d'eau partagés. On procédera donc à la revue des cadres de concertation existant en matière de gestion des cours d'eau transfrontaliers. On insistera en particulier sur les organismes de bassin et sur certains accords portant sur des portions de bassins partagés.

**Principaux accords relatifs à la gestion des cours d'eau transfrontaliers**

*Les principales organisations de bassin de l'Afrique de l'Ouest*

A l'exception de la Volta, les principaux cours d'eau transfrontaliers de la région sont dotés d'organisations de bassin : Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN), Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie (OMVG), Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT) (tableau 2).

*Essai de typologie*

Les principales organisations de bassin de la région exercent à la fois des fonctions de développement et de réglementation. En ce qui concerne cette dernière fonction (formulation et suivi du respect de principes et codes de conduite), l'effectivité et l'efficacité du rôle des organisations de bassin de la région sont variables. Certaines semblent plus dynamiques que d'autres, et ce n'est peut-être pas un hasard.

---

<sup>7</sup> voir : <http://www.abn.ne/abninfo4/actuelle.htm>

Bassin fluvial	Agence de bassin	Date de création
Niger	ABN (Autorité du Bassin du Niger)	1963
Lac Tchad	CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad)	1964
Gambie	OMVG (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie)	1967
Sénégal	OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal)	1972

Tableau 2. Organisations de bassin sur cours d'eau transfrontaliers de l'Afrique de l'Ouest

Pour analyser cette différence de performance, nous distinguons les organisations de bassin de fleuves-frontières (cas du fleuve Sénégal) et de ceux de fleuves-relais (cas des fleuve Niger et Gambie). Un fleuve-frontière est un fleuve dont le cours principal constitue la frontière entre deux Etats. Le fleuve Sénégal par exemple constitue la frontière entre le Mali et le Sénégal sur une partie de son cours et la frontière entre la Mauritanie et le Sénégal sur une autre partie de son cours. Ces trois pays sont les Etats membres de l'OMVS. La Guinée d'où le Sénégal prend sa source n'est pas membre de l'organisation de bassin. Le fleuve Niger par contre traverse successivement la Guinée, le Mali, le Niger et le Nigeria. Son principal affluent, le Bénoué, traverse successivement le Tchad, le Cameroun et le Nigeria. Ces différents pays ainsi que le Burkina, le Bénin<sup>1</sup>, la Côte d'Ivoire d'où partent quelques affluents du fleuve, forment les Etats membres de l'Autorité du Bassin du fleuve Niger. Le dispositif de la Gambie est similaire à celui du fleuve Niger.

#### *L'OMVS : Les avantages de l'impératif de coopération autour d'un fleuve-frontière*

La convention portant création de OMVS en 1972 s'est accompagnée d'une autre convention déclarant le fleuve Sénégal et ses affluents comme « cours d'eau international » sur les territoires des Etats membres. L'une des conséquences d'un statut c'est que toute intervention pouvant altérer de façon significative le régime du fleuve et les conditions de sa navigabilité, les formes d'exploitation agro-industrielles des eaux du fleuve ou ses caractéristiques écologiques, nécessite l'approbation préalable des Etats membres de l'OMVS. La convention de 1978 sur le statut des ouvrages communs déclare les infrastructures hydrauliques et électriques (barrages, lignes de transmissions, infrastructures portuaires, etc...) à réaliser dans le cadre de l'OMVS comme propriétés communes et indivisibles des Etats membres.

La mission de l'OMVS est de promouvoir la coopération entre ses Etats membres, la coordination des études techniques et les activités de mise en valeur du fleuve, et la régularisation du débit de fleuve pour répondre aux besoins de l'irrigation, de production d'électricité et de la navigation.

Depuis sa création, l'OMVS a fait preuve d'un grand dynamisme, marqué notamment par la réalisation des barrages de Diama et de Manantali. Plus récemment, ses Etats membres ont adopté une charte qui fixe les principes et modalités de la

<sup>1</sup> Le fleuve Niger et son affluent le Mékrou servent de frontière entre le Bénin et le Niger sur une partie de leur cours.

répartition des eaux du fleuve entre les différents secteurs d'utilisation, y compris l'environnement.

Ce dynamisme tient peut-être au moins en partie à la concordance des intérêts des Etats membres et à l'impératif de coopération que dicte la nécessité de gérer la frontière commune qui se trouve être le fleuve. En prenant en compte la Guinée, autre pays du bassin, mais situé en amont, le problème devient tout autre. Comme le montre le tableau 3, aucun des grands volets du programme actuel de l'OMVS (irrigation, production d'énergie et navigation) ne revêt un intérêt critique pour la Guinée. Si la Guinée décide unilatéralement d'aménager le haut Niger, les problèmes seraient bien plus graves à l'aval. Si ce pays était membre de l'OMVS il aurait fallu trouver d'autres programmes autres à même de lui garantir une part équitable des gains de la coopération.

Pays	Energie hydroélectrique	Irrigation	Navigation	Productions de décrue <sup>2</sup>
Guinée	Potentiellement haute	Néant	Néant	Néant
Mali	Haute	Faible	Très haute	Faible
Mauritanie	Très haute	Très haute	Haute	Haute
Senegal	Très haute	Très haute	Haute	Haute

Tableau 3. Priorités des États riverains par rapport aux volets du programme actuel de l'OMVS

Néanmoins, tout le monde reconnaît la nécessité d'associer plus étroitement la Guinée pour une gestion durable du bassin du fleuve Sénégal. Un pas significatif a été fait dans ce sens avec le protocole cadre de coopération signée en août 2002 entre l'OMVS et la Guinée. Ce protocole donne à la Guinée le statut d'observateur au sein de l'OMVS en attendant son adhésion future (Diagne, 2002). Une des contraintes à une telle évolution semble être la difficulté de trouver des programmes de développement mutuellement bénéfiques aussi bien aux pays actuellement membres de l'OMVS qu'à la Guinée. Cette difficulté donne une idée du casse-tête que vivent les organisations de bassin qui gèrent des cours d'eau le long desquelles se relaient les Etats membres.

<sup>2</sup> Il s'agit ici des activités productives qui dépendent de la crue annuelle (agriculture de décrue, pêche, élevage). Les conditions de cette crue pourraient être améliorées si les Etats membres de l'OMVS décidaient de faire de la génération de crues artificielles une fonction permanente du barrage de Manantali.

*L'ABN : Le casse-tête des intérêts nationaux qui divergent le long d'un fleuve-transfrontalier*

C'est en 1963 que fut créée la Commission du Fleuve Niger (CFN) —qui deviendra l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) en 1980. Le but de la CFN était de promouvoir une « étroite coopération » entre les Etats membres en ce qui concerne « l'étude et l'exécution de tous les projets susceptibles d'exercer une influence sensible » sur le régime du fleuve Niger et ses affluents et sur les secteurs qui dépendent de ce régime (agriculture, énergie, santé, environnement naturel). Il s'agissait donc plus d'un rôle de coordination, la CFN offrant un cadre de concertation et d'échange d'informations entre les Etats. Avec la création de l'ABN, un accent particulier fut mis sur le rôle de promotion du développement, sur l'élaboration et l'exécution de plans de mise en valeur des eaux du bassin. Ces fonctions de promotion de la coopération et du développement ont été réaffirmées dans le cadre de la Convention de 1987. Sur ces deux questions (coopération et développement), le bilan de l'ABN reste mitigé. Malgré les révisions fréquentes de la convention portant création du bassin (1968, 1978, 1979, 1980, 1987), le niveau de coopération entre Etats reste faible, et les réalisations économiques assez discrètes. Par exemple le plan quinquennal de développement 1987-92 a à peine connu un début d'exécution (Tchoué, 2002).

Malgré un certain renouveau noté depuis 1998, l'ABN donne l'impression d'une institution qui cherche encore ses repères. Une des questions critiques auxquelles elle est confrontée est de trouver une formule d'incitation de ses différents Etats membres à la coopération. A cause de sa taille (plus de 4000 km de long, près de 1,5 millions de km<sup>2</sup> de superficie pour l'ensemble du bassin et 1,1 million pour le bassin actif) et sa configuration de «fleuve-relais» ou «fleuve transfrontalier», le fleuve Niger se prête mal à des formules de gestion commune où chaque Etat membre (de la Guinée au Cameroun) puisse identifier clairement des avantages plus importants que ceux qu'il peut obtenir en faisant cavalier seul ou en concevant des formules de collaboration à plus petite échelle (e.g. coopération bilatérale).

Récemment, les chefs d'Etat des pays membres de l'ABN ont adopté une déclaration dite de Paris qui énonce des principes généraux de bonne gouvernance du bassin du Niger. A travers cette déclaration, les pays membres de l'ABN s'engagent aussi dans un processus de concertation visant l'adoption d'une vision partagée du fleuve et de son développement. Cet exercice devra déboucher sur la formulation et la mise en œuvre d'un ambitieux programme de développement à long terme du bassin. La matérialisation de ces ambitions démentirait le déterminisme géographique dont il est fait cas plus haut et qui prédisposerait peu le fleuve Niger à la coopération économique à l'échelle du bassin versant.

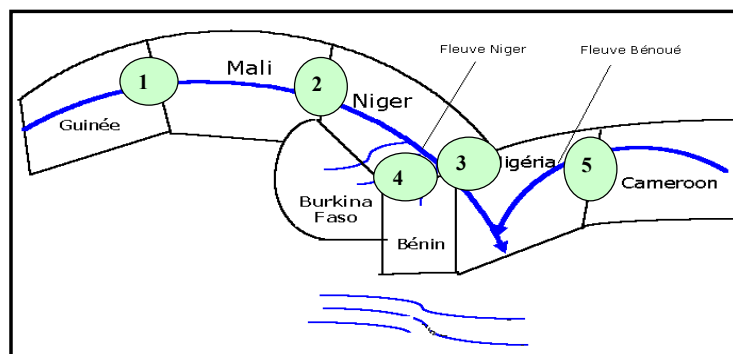
*Autres accords internationaux sur les cours d'eau partagés de l'Afrique de l'Ouest*

Figure 5. Schéma des accords bilatéraux le long du fleuve Niger. Légende : 1) Projet conjoint Mali-Guinée : GHENIS ; 2) Protocole d'Accord entre le Niger et le Mali sur l'utilisation des eaux du fleuve Niger (12 juillet 1988) ; 3) Protocole entre le Niger et le Nigeria sur le Partage équitable dans le développement, la conservation et l'utilisation de leurs ressources en eau communes (18 juillet 1990) ; 4) Accord Bénin-Niger sur le fleuve Mékrou, affluent du Niger (1999) ; 5) Protocole d'Accord entre le Cameroun et le Nigeria (janvier 2000).

C'est peut-être à cause de ce qui a été observé plus haut que c'est sur des portions du bassin du fleuve Niger que portent la plupart des accords bilatéraux que nous avons pu identifier sur les cours d'eau partagés de la sous-région (figure 5). Parmi ces accords, on peut citer les suivants :

**Bénin-Niger** : Accord entre la République du Niger et la République du Bénin relatif à la réalisation de l'aménagement hydroélectrique du site de Dyodyonga sur le fleuve Mékrou (janvier 1999)

**Nigeria-Niger** : Accord entre le Nigeria et le Niger concernant le partage équitable dans le cadre du développement, de la conservation et de la mise en valeur de leurs ressources en eau communes (1990). Cet accord concerne les sous-bassins de Maggia,-Lamido, Gada-Goulbi, Tagwai-El Fadama, Komadugu Yobe. Ce dernier cours d'eau fait partie du réseau du bassin du Lac Tchad.

**Niger-Mali** : Protocole d'accord entre le Niger et le Mali relatif à la coopération dans l'utilisation des ressources en eau du Niger (juillet 1988).

**Guinée-Mali** : Même s'il ne s'agit pas à proprement parler d'un accord sur un code de conduite, le projet GHENIS (projet de gestion hydro-écologique du Niger Supérieur) mérite d'être signalé. Il vise la gestion hydro-écologique de la région du fleuve Niger frontalière entre la Guinée et le Mali. Le projet œuvre pour l'amélioration des connaissances hydro-écologiques de cette partie du bassin du Niger et aide à une prise de décision éclairée

en ce qui concerne les risques de dégradation de l'eau du fleuve et des ressources qui lui sont associées.

**Nigeria-Cameroun** : Protocole d'Accord décidé à l'issue d'une réunion en janvier 2000 sous l'égide de l'ABN. Il porte sur l'échange d'information sur les ouvrages hydrauliques et les données hydrologiques quotidiennes, des actions coordonnées sur les lâchers à partir des barrages et autres retenues d'eau, la concertation et l'accord préalable avant la construction de tout nouvel ouvrage hydraulique, la conception et la mise en œuvre éventuelle de projets conjoints pour l'intérêt réciproque des populations rurales des deux communautés, l'inventaire des ouvrages existants, etc ...

**Tchad-Cameroun** : Accord dit de Moundou (1970) portant sur les niveaux de prélèvement des eaux du Logone à des fins d'aménagements hydro-agricoles.

Il est fort probable que la nécessité de ces accords —tous postérieurs à la création des organisations de bassin concernés (ABN et CBLT)— s'explique par la faiblesse de ces organisations de bassins dans leurs fonctions de régulation et en tant que cadre de coopération pour le développement économique du bassin considéré. Il est à noter que dans certains cas (Accord Nigeria-Cameroun), c'est l'organisation de bassin (l'ABN en l'occurrence) qui facilite les discussions devant mener à la signature de l'accord en question. À l'exception du programme GHENIS entre le Mali et la Guinée, la plupart des accords bilatéraux ne sont pas encore mis à profit pour promouvoir des projets significatifs intégrés de développement, ce qui aurait pu être un moyen de compenser les faiblesses dans ce domaine d'organisations de bassin telles que l'ABN, la CBLT et l'OMVG.

Au total, on observe donc qu'une organisation de bassin telle que l'OMVS a fait preuve d'un grand dynamisme aussi bien comme instrument de gestion des disputes et conflits que comme outil de développement. Ce dynamisme semble être dans une certaine mesure lié au caractère frontalier de ce cours d'eau, ce qui a beaucoup facilité la définition de formule appropriée de partage des coûts et bénéfices des efforts de développement du bassin entre Etats membres. Dans les cas des fleuves transfrontaliers —c'est-à-dire s'écoulant d'un pays à l'autre— les organisations de bassins mises en place (ABN, OMVG) semblent éprouver des difficultés à formuler des mécanismes de partage équitable des avantages du développement du bassin entre Etats membres. Ceci est peut-être pour beaucoup dans la multiplication des accords bilatéraux de coopération entre pays riverains contigus (entre OMVS et la Guinée située en amont ; ou, sur le fleuve Niger, entre le Mali et Niger, entre le Niger et le Nigeria, entre le Nigeria et le Cameroun, etc.). On se retrouve ainsi avec deux niveaux de coopération internationale sur le même bassin : un niveau bilatéral et un niveau multilatéral à l'échelle du bassin. Jusqu'ici il n'y a pas eu de réflexion approfondie sur les rôles et fonctions que chacun de ces niveaux de coopération pourrait ou devrait jouer. Ce dispositif pourrait cependant être un atout, c'est-à-dire servir de base pour mettre en pratique un principe de

bonne gouvernance souvent évoqué : celui de subsidiarité. Les organisations de bassins couvrant de grands fleuves transfrontaliers tels que le Niger (ABN) ou la Gambie (OMVG) pourraient mettre l'accent sur les fonctions de régulation et laisser les fonctions de développement à des structures bilatérales de coopérations qui pourraient s'appuyer sur les accords déjà signés.

### **Droit international sur les eaux partagées**

La Convention des Nations Unies de 1997 sur l'utilisation des cours d'eau partagés à des fins autres que la navigation est le produit de près de trente années de réflexion et de débats d'experts (Bradlow, 2000; McCaffrey, 2001 ; Ly, 2002). Bien qu'elle ne soit pas entrée en vigueur —ce qui aurait nécessité qu'elle soit ratifiée par au moins 35 Etats— cette Convention sert de norme internationale en ce qui concerne la définition de la responsabilité des Etats dans la gestion des bassins fluviaux d'eau transfrontaliers. Elle énonce de grands principes tels que ceux sur « l'utilisation équitable et raisonnable » des cours d'eau partagés, l'obligation de ne pas causer de dommages significatifs à des pays tiers, la notification préalable, le partage des informations entre Etats, la concertation entre Etats riverains, etc. (Voir aussi Wouters, 2000). En Afrique de l'Ouest, seule la Côte d'Ivoire l'a pour le moment ratifiée, mais cette convention inspire de plus en plus les Etats dans la définition de codes de conduite et de principes généraux de gestion des cours d'eau partagés. Certains des principes de la Convention (notification préalable, le fait d'éviter de causer des dommages significatifs à des pays tiers, etc...) sont reflétés par exemple dans la Charte de l'eau de l'OMVS adopté en 2002<sup>3</sup> et la récente Déclaration à Paris du Sommet des Chefs d'Etat de l'Autorité du Bassin du Niger<sup>4</sup>.

D'autres textes pertinents pour une bonne gestion des cours d'eau partagés concernent la Convention de 1971 sur les zones humides d'importance internationale (ou Convention de Ramsar) et celle de 1992 sur la biodiversité. À l'exception du Liberia et du Cap Vert, tous les Etats de l'Afrique de l'Ouest ont adhéré à la Convention de Ramsar. La région compte aujourd'hui 46 sites Ramsar d'une superficie cumulée de 10.073.059 hectares. Aux termes de l'article 3 de la Convention, les parties contractantes ont l'obligation de créer les conditions favorables à la conservation des zones humides inscrites sur la liste Ramsar. En outre, les parties contractantes s'engagent à promouvoir l'utilisation durable de toutes les zones humides sur leur territoire, que celles-ci soient inscrites ou non sur la liste Ramsar. Il convient d'ajouter que lors de la 7e Conférence des Parties contractantes de la Convention de Ramsar (COP7), une résolution a été adoptée sur l'intégration de la conservation et de

<sup>3</sup> Voir : [http://lafrique.free.fr/traites/omvs\\_200205.pdf](http://lafrique.free.fr/traites/omvs_200205.pdf)

<sup>4</sup> <http://www.diplomatie.gouv.fr/actu/bulletin.asp?liste=20040427.html#Chapitre5>

l'utilisation rationnelle des zones humides dans la gestion des bassins hydrographiques (Résolution VII-18). La 8<sup>ème</sup> Conférence des Parties Contractants de la Convention Ramsar, tenue à Valence en Espagne en novembre 2002 a permis de faire des avancées notables dans la définition de lignes directrices pour une répartition et une gestion de l'eau permettant de maintenir les fonctions écologiques des zones humides. Ces lignes directrices préconisent l'élaboration et la mise en œuvre de politiques et d'outils législatifs clarifiant le statut légal de l'eau et les priorités pour l'allocation de l'eau aux écosystèmes et aux autres usages. Il apparaît ainsi clairement ainsi que la mise en œuvre effective de la Convention de Ramsar et des directives et résolutions mentionnées plus haut contribuerait à donner une dimension écosystémique plus forte à la gestion des ressources en eau et des bassins fluviaux transfrontaliers.

On peut dire la même chose à propos de la Convention sur la diversité biologique (1992), ratifiée par tous les Etats de la région à l'exception de la Sierra Leone. Cette convention vise "la conservation et l'utilisation durable des ressources biologiques" et cherche à "atténuer ou éviter les effets défavorables à la diversité biologique" et à "prévenir toute menace sur la biodiversité biologique". Cette convention insiste en particulier sur la nécessité de mener des études d'impacts environnementaux en vue de minimiser les dommages sur les écosystèmes, fluviaux en l'occurrence.

Au total la mise en œuvre effective de ces conventions environnementales par les Etats ouest-africains pourrait permettre de renforcer le maillon faible de la gestion des cours d'eau partagés, c'est-à-dire la préservation de l'intégrité du fleuve en tant qu'écosystème et la prise en compte des besoins en eau des divers autres écosystèmes du bassin visé.

#### **Recommandations de la Commission mondiale des barrages à propos de barrages à construire sur cours d'eau partagés**

En l'absence d'un cadre juridique contraignant au niveau international, et en attendant que les différents bassins fluviaux de la région se dotent de codes de conduite en la matière, la question se pose de savoir comment amener les Etats à plus de sagesse et de concertation dans la gestion des eaux partagées.

La Commission mondiale des barrages (CMB) distingue trois types de pays: (a) ceux qui disposent des ressources financières et techniques suffisantes leur permettant de développer leurs propres programmes d'interventions en toute autonomie; (b) ceux qui ont besoin d'assistance technique et financière pour entreprendre leurs projets; (c) ceux qui peuvent avoir les moyens nécessaires pour réaliser leurs projets, mais souvent au détriment d'autres secteurs, pour lesquels ils sont obligés de solliciter l'assistance extérieure (WCD, 2000; Niasse, 2002)

Pour la première catégorie de pays (souvent les pays industrialisés), la CMB considère que c'est le travail de sensibilisation de la société civile qui peut les contraindre au

respect des normes internationalement admises. Pour les pays des seconde et troisième catégories —catégories auxquelles appartiennent les Etats de l'Afrique de l'Ouest— les institutions internationales de financement peuvent avoir une influence décisive. La CMB en appelle à ces institutions de financement extérieur pour peser de tout leur poids pour aider à promouvoir les principes de négociation entre Etats riverains. Cette pression peut être exercée sous les formes suivantes (WCD, 2000):

- Faire en sorte que les politiques nationales de l'eau prévoient spécifiquement que les bassins fluviaux partagés fassent l'objet d'accords négociés fondés sur les principes de l'utilisation équitable et raisonnable, de la prévention des dommages importants et de l'information préalable.
- Assurer que les barrages prévus sur des cours d'eau communs ne soient pas construits lorsque les Etats riverains soulèvent une objection considérée comme fondée par un groupe d'experts indépendants. Les litiges les plus complexes doivent être réglés par le biais des divers dispositifs de règlement des conflits et, en dernier ressort, par la Cour internationale de justice.

#### **Conclusion : Eléments d'orientation pour la bonne gestion des cours d'eau partagés**

La construction de grandes infrastructures hydrauliques et hydro-agricoles (barrages, canaux d'irrigation ou systèmes de transferts inter-bassins) entraîne souvent une réorganisation profonde des conditions d'accès et d'utilisation des ressources en eau, avec des conséquences plus ou moins importantes sur les modalités d'accès et d'usage des ressources en eau. Au cœur des tensions actuelles et des risques de conflits de l'eau en Afrique de l'Ouest, on trouve de tels ouvrages. Ceci n'est pas spécifique pour l'Afrique de l'Ouest : tous les cas extrêmes de conflits de l'eau répertoriés par Wolf et al (2003 :41) concernent soit des variations importantes dans la disponibilité de l'eau et/ou la réalisation soit les modes de gestion d'infrastructures hydriques (barrages, dérivation de l'eau, programmes d'irrigation). La multiplicité des projets de barrages envisagés unilatéralement par des Etats dans des bassins transfrontaliers fait de l'Afrique de l'Ouest une région à haut risque de conflits de l'eau. Ce risque est accentué par la haute interdépendance hydrique des pays de la région, la faiblesse relative des organisations de bassins là où elles existent, et la non prise en compte ou l'ignorance des normes internationales concernant les cours d'eau partagés.

Il convient donc d'augmenter la capacité de l'Afrique de l'Ouest à prévenir les risques de conflits et à les gérer de façon appropriée lorsqu'ils surviennent. Les suggestions suivantes peuvent être faites pour une gestion pacifique des cours d'eau internationaux de l'Afrique de l'Ouest :

- i. Renforcer la fonction de régulation, de prévention et de gestion des conflits des organismes de bassins transfrontaliers, notamment en :

- Mettant en place des systèmes efficaces de collecte et de partage des informations d'aide à la décision. Pour atteindre cet objectif il faut d'abord améliorer les réseaux hydrologiques (observateurs, équipes de techniciens itinérantes, échelle et appareils enregistreurs) et assurer un niveau de financement approprié pour leur maintenance et pour l'exploitation des données collectées. De même, on peut aussi noter l'importance pour les hydrologues de disposer des données de précipitation, pour connaître les bilans hydrologiques des fleuves et rivières, qui sont essentiels à l'établissement des normes hydrologiques de construction des ouvrages hydrauliques. L'importance de cette question de la qualité de l'information est mise en évidence par la tension dans le bassin de la Volta entre le Ghana et le Burkina ; et les craintes du Nigeria à propos des programmes de barrages des pays amont (Niger et Mali).
  - Instaurant des dialogues en vue de l'adoption de codes de conduite ou chartes de l'eau pour chacun des bassins partagés. Dans des bassins tels que le fleuve Sénégal ou le fleuve Niger, les bases d'un code de conduite sont jetées (Charte de l'eau de l'OMVS en 2002 et Déclaration des chefs d'Etat de l'ABN en avril 2004) et il convient maintenant de les rendre opérationnelles en vue de leur mise en œuvre effective.
  - Œuvrant pour des concertations en vue de l'élaboration et de l'adoption d'un protocole régional de l'eau, ce qui faciliterait la tâche aux nombreux Etats qui sont parties prenantes dans plusieurs bassins partagés (Guinée, Mali, Burkina, Niger, Nigeria, etc...). Un tel protocole aiderait à mieux harmoniser les codes de conduites à élaborer dans les différents bassins de la région.
  - Encourageant les Etats à ratifier la convention des Nations Unies sur les eaux partagées de 1997, et en prenant en compte effectivement ses principes dans les codes de conduite à l'échelle des bassins partagés et à l'échelle régionale.
  - Aider les Etats à remplir leurs obligations en tant que parties prenantes des conventions environnementales internationales, en particulier celle de Ramar et celle sur la diversité biologique. La mise en œuvre de ces conventions permettrait de mieux prendre en compte et protéger l'intégrité des bassins fluviaux en tant qu'écosystèmes.
- ii. Encourager et encadrer l'adoption d'accords bilatéraux sur des sections des cours d'eau afin de compenser les faiblesses inhérentes à la configuration de certains cours d'eau, les fleuves-relais en particulier. Mais il faudrait aller plus loin. La signature d'accords bilatéraux offre une bonne base pour promouvoir des programmes de développement intégrés difficilement envisageables à l'échelle de certains bassins fluviaux du fait de la divergence des intérêts de certains pays membre.
- iii. Initier un dialogue sur les grands barrages en vue de la prise en compte des directives et normes internationales appropriées dans les stratégies nationales et régionales de planification et de mise en valeur des cours d'eau. Etant à l'origine de la plupart des cas extrêmes de conflits et souvent à la source de graves perturbations écologiques parfois irréversibles, les barrages doivent faire l'objet d'une attention particulière.
- iv. Encourager les recherches et promouvoir l'adoption de formules appropriées de partage des coûts et avantages de la gestion des ressources en eau des bassins partagés. La perception d'un partage inéquitable des coûts et avantages de la mise en valeur des bassins fluviaux est toujours au centre des disputes ou tensions autour des eaux partagés.
- v. Systématiser les études d'impact des aménagements (physique, biologique, humain, politique, etc.), avant leur construction, ce qui devrait être une des responsabilités majeures des agences de bassin.

## Bibliographie

- ABN. 2002. *Réunion d'information sur les barrages de Taoussa (Mali) et de Kandadji (Niger)*. Niamey 6-7 août. Autorité du Bassin du Niger. Niamey.
- Adams, W. 2000. The Social Impacts of Large Dams: Equity and Distributional Issues. Working Paper. The World Commission on Dams. Cape Town. Nov. Source: [www.dams.org/docs/kbase/thematic/tr11main.pdf](http://www.dams.org/docs/kbase/thematic/tr11main.pdf)
- Andreini, M; N. van de Giesen, et. al. 2000. *Volta Basin Water Balance*. Center for Development Research. University of Bonn. ZEF Discussion Papers. No. 21. March;
- Ashton, P. J. 2002. Avoiding Conflicts over Africa's Water Resources. *Ambio*. Vol 31 No.3, May. Pp236-242
- Bradlow, D. 2000. Report on International and Comparative Law Applicable to Large Dam Construction. Contributing Paper to Thematic Review V4. World Commission on Dams. Cape Town ([www.dams.org](http://www.dams.org));
- Diagne, B. 2002. Modèles d'organisation de bassin en Afrique de l'Ouest : le cas de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS). Communication à l'atelier sur : *La Gouvernance de l'eau. Aspects juridiques et institutionnels de la gestion des ressources en eau en Afrique de l'Ouest*. UICN Bureau pour l'Afrique de l'Ouest (BRAO) et Centre du droit de l'environnement (UICN-ELC). Ouagadougou, Novembre 2002.
- Fourd, J. P. 2002. Petites retenues d'eau. Performance et coûts : Quelles leçons tirer des expériences dans la sous-région, du Burkina Faso en particulier. Communication présentée au *Forum régional sur les zones humides* . UICN-BRAO. Komienga (Burkina Faso). Juin 12-14 pp.32-47
- GWP-WATAC. 2000. *Water for the 21<sup>st</sup> Century. Vision to Action for West Africa*. Global Water Partnership-West Africa Technical Advisory Committee (GWP-WATAC). Ouagadougou.
- Horowitz, M.M. 1989. Victims of Development. *Development Anthropology Network*. 7(2):1-8
- ICJ. No date. Land and Maritime Boundary Between Cameroon and Nigeria. International Court of Justice (ICJ): [www.icj-cij.org/icjwww/idocket/icn/icnframe.htm](http://www.icj-cij.org/icjwww/idocket/icn/icnframe.htm)
- IRIN News.2003a.Cameroon-Nigeria: Border Commission discusses handover of 33 villages. Integrated Regional Information Networks(IRIN):

- [www.irinnews.org/report.asp?ReportID=37536&SelectRegion=West\\_Africa](http://www.irinnews.org/report.asp?ReportID=37536&SelectRegion=West_Africa). Oct. 29. Abuja
- IRIN News. 2003b : Cameroon-Nigeria: Handover of Lake Chad villages begins. Integrated Regional Information Networks (IRIN): [www.irinnews.org/report.asp?ReportID=38319&SelectRegion=West\\_Africa](http://www.irinnews.org/report.asp?ReportID=38319&SelectRegion=West_Africa) Dec. 9. Lagos
- L'Hôte, Y ; G. Mahé ; B. Somé and J. Triboulet. 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000. *Hydrological Sciences* No. 47 (4). August. Pp563-572.
- Ly, I. 2002. Les aspects juridiques liés à la gestion des eaux transfrontalières : Prévention et résolution des conflits. Communication à l'Atelier sur la Gouvernance de l'eau : Aspects juridiques et institutionnels de la gestion des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. UICN-Bureau pour l'Afrique de l'Ouest (BRAO) et Centre du droit de l'environnement (ELC)
- Magistro, J. V. 1993. Ethnicity and Transboundary Conflict in the Senegal River Valley. *Cahiers d'Etudes Africaines*. No.130-XXXIII-2, pp 201-232.
- Mahé G., Olivry J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989, *Sécheresse*, n°1, vol 6, 109-117
- McCaffrey, S. 2001. The Contribution of the UN Convention on the Law of the Non-Navigational Uses of International Watercourses. *International Journal of Global Environmental Issues*, Vol. 1, Nos. 3/4, 2001 ;
- Niasse, M. 2002. Equity Dimensions of Dams-Based Water Resources Development - Winners and Losers. In Steffen, Will; Jäger, J.; Carlson, D.J.; Bradshaw, C (ed). *Challenges of a Changing Earth*. Springer. Paris, Londres. Pp.39-43
- Niasse, M.. 2002. Construction de barrages sur cours d'eau partagés. Les recommandations de la Commission Mondiale des Barrages. Communication à l'Atelier sur la Gouvernance de l'eau. Aspects juridiques et institutionnels de la gestion de l'eau en Afrique de l'Ouest. UICN-Bureau régional pour l'Afrique de l'Ouest (BRAO) & Centre pour le droit de l'environnement (ELC). Ouagadougou. Novembre 2002.
- Niasse, M. ; Afouda, A. ; Amani, A. (ed.). 2003. *Eau, zones humides et désertification en Afrique de l'Ouest. Stratégie régionale de préparation et d'adaptation à la variabilité et au changement climatique*. CILSS-GWP/WAWP-UICN/BRAO. Ouagadougou.
- Oyebande, L. ; Amani, A. ; Mahé, G. and Diop, I. N.. 2002. *Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management*. Working Paper. IUCN-BRAO. Ouagadougou. Avril ;
- Paturol J. E, Servat E, Kouame B, Lubes H, Ouedraogo M, Masson JM. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part two : "an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 197, 191 : 16-36.
- Postel, S. L. Postel and Wolf, A.T.. 2001. Dehydrating Conflict. *Foreign Policy*. Sep.18 <http://www.globalpolicy.org/security/natres/water/2001/1001fpol.htm>
- Parker, R. The Senegal-Mauritania Conflict of 1989: a Fragile Equilibrium. *Journal of Modern African Studies*, 29, 1 (1991), pp 155-171
- Ravenga, C; Brunner, J; Henninger, N.;Kassen, K.; Payne, R. 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems. Freshwater Systems. WRI. Washington, DC ([http://pdf.wri.org/page\\_freshwater.pdf](http://pdf.wri.org/page_freshwater.pdf))
- Seck, S. M. 1991. Les cultivateurs "transfrontaliers" de décrue face à la question foncière. In Bernard Crousse, Paul Mathieu, Sidy M. Seck (ed). *La Vallée du Fleuve Sénégal. Evaluations et perspectives d'une décennie d'aménagements*. Paris. Karthala
- Servat E ; Paturol J.E. ; Lubes H, Kouame B, Ouedraogo M, Masson J.M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part one : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 197, 191 : 1-15.
- Tchoué, G. 2002. Le modèle de l'Autorité du Bassin du Niger. Communication à l'atelier sur : *La Gouvernance de l'eau. Aspects juridiques et institutionnels de la gestion des ressources en eau en Afrique de l'Ouest*. UICN Bureau pour l'Afrique de l'Ouest (BRAO) et Centre du droit de l'environnement (UICN-ELC). Ouagadougou, Novembre 2002.
- Turton, A. R; 2000; Water wars in Southern Africa: Challenging conventional wisdom. In *Water for Peace in the Middle East and Southern Africa*. Green Cross International. Genève. Pp 112-130
- Van de Giesen, N. ; M. Andreini, A. van Edig & P. Vleg. 2001. *Competition for Water Resources of the Volta Basin*. Center for Development Research. University of Bonn.;
- WCD. 2002. *Dams and Development. A New Framework for Decision-Making*. World Commission on Dams. Earthscan. London & Sterling;
- Wolf, A. 2001.. Water, Conflict, and Cooperation. In Ruth S. Meinzen-Dick and Mark W. Rosegrant (eds) : *Overcoming Water Scarcity and Quality Constraints*. 2020 Focus 9 : October. Source: [http://www.ifpri.org/2020/focus/focus09/focus09\\_14.htm](http://www.ifpri.org/2020/focus/focus09/focus09_14.htm)
- Wolf, A.T.; Yoffe, S.B.; and Giordano, M. 2003. International Waters: Identifying Basins at Risk. *Water Policy* No.5 pp29-60
- Wouters, P. 2000. The Legal Response to International Water Scarcity and Water Conflicts: The UN Watercourse Convention and Beyond. Source: [www.thewaterpage.com/pat\\_wouters1.htm](http://www.thewaterpage.com/pat_wouters1.htm)



# LE QUÉBEC ÉLÈVE-MODÈLE DU CANADA DANS LE DOSSIER DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE : concours de circonstances ou l'exemple à suivre?

Sebastian Weissenberger, Doctorant, Institut des sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, Courriel : d137314@er.uqam.ca

---

**Résumé :** Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du Québec sont bien inférieures à celles du Canada, mais assez proches de celles des états européens. Le facteur principal permettant au Québec de maintenir ces émissions à un niveau relativement faible est l'énergie hydroélectrique. Le recours à cette source d'électricité dépourvue d'émissions de GES cache le fait que le Québec consomme par habitant autant d'énergie que le Canada ou les États-Unis et deux fois plus que la moyenne des pays européens. Par rapport au Canada, l'absence d'industrie des combustibles fossiles ainsi que des secteurs du transport, de l'agriculture et de l'industrie, moindres émetteurs de GES contribuent à un bilan d'émissions plus favorable du Québec. Une étude des indicateurs énergétiques entre 1980 et 2000 suggère que les prix du pétrole ainsi que les avancées technologiques au niveau mondial, notamment dans les secteurs du magnésium et de l'aluminium, sont un régulateur d'émissions de GES bien plus efficace que les politiques gouvernementales supposées encourager la réduction des émissions. Il est fort à supposer que des incitatifs économiques permettraient de mobiliser un considérable potentiel de réduction des émissions de GES par le biais d'une augmentation de l'efficacité énergétique. Au sein du plan d'action du Canada, le Québec devrait cependant être crédité de son bilan positif et devrait avoir à suivre une trajectoire de réduction d'émission moins abrupte que l'ensemble du pays.

**Mots clés :** énergie, environnement, électricité, gaz à effet de serre, émissions, externalités, efficacité énergétique, intensité énergétique, protocole de Kyoto

**Abstract :** Quebec's greenhouse gas (GHG) emissions are, on a per capita basis well below the Canadian average and close to those of developed European countries. The availability of zero-emission hydroelectric energy enables Quebec to keep its emissions at the level of those European countries, although its per capita energy consumption is twice as high as theirs and similar to that of Canada or the United States. However, hydroelectricity only partly explains the lower emissions of Quebec with respect to the Canadian average. The absence of a fossil fuel extraction sector and lower emissions in other sectors such as transport, agriculture and industry also contribute to this trend. An analysis of energy sector indicators over the past two decades suggests that advances in industrial technology, as in the case of the aluminum and magnesium industry and oil prices are far better regulators of greenhouse gas emissions than government policies designed to incite emission reductions. The low energy efficiency and experiences of other countries lead to believe that economic incentives would uncover a significant potential of greenhouse gas emissions through the reduction of energy consumption. In the forthcoming Canadian plan for the implementation of the Kyoto objectives, Quebec should be credited for its lesser emissions and their increase rate and be compelled to follow a less steep emission reduction curve than other provinces with less advantageous GHG budgets.

**Key Words:** energy, environment, electricity, greenhouse gases, emissions, externalities, energy efficiency, energy intensity, Kyoto protocol

**Zusammenfassung:** Quebecs pro Kopf Treibhausgasausstöße sind erheblich niedriger als der kanadische Durchschnitt und nahe denen von entwickelten europäischen Ländern. Der Zugriff zu emissionsfreier Wasserkraft erlaubt es Quebec, trotz eines doppelt so hohen Energieverbrauchs, ähnlich dem Kanadas oder der Vereinigten Staaten, seine Treibhausgasausstöße auf diesem relativ niedrigen Niveau zu halten. Im Vergleich mit dem kanadischen Durchschnitt kommen jedoch andere Bereiche – das Transportwesen, die Industrie, die Landwirtschaft und nicht zuletzt das Fehlen eines fossilen Treibstoffsektors – dazu, in denen Quebec's Emissionen niedriger liegen. Eine Untersuchung von Energie- und Treibhausgasstatistiken der letzten zwei Jahrzehnte zeigt, daß nicht so sehr eine konkrete Klimapolitik als eher Erdölpreise und Technologiefortschritte in der Industrie, u.a. der Metallverarbeitung, die Treibhausgasausstöße regulieren. Die geringe Energieeffizienz Quebecs legt nahe, daß wirtschaftliche Anreize, wie sie in anderen Ländern erfolgreich angewandt wurden, auch in Québec zu einer erheblichen Reduzierung der Treibhausgasausstöße durch eine Verringerung des Energieverbrauchs führen könnten. Jedoch sollte bei der Implementierung eines kanadischen Emissionsplans berücksichtigt werden, dass Quebecs Emissionen bereits unter dem landesweiten Durchschnitt liegen und auch im letzten Jahrzehnt deutlich langsamer zugenommen haben. Daher sollte die Zielsetzung für Quebec niedriger angelegt werden als für andere Provinzen, die eine weniger gute Treibhausgasbilanz aufzuweisen haben.

---

## Introduction

Le 17 décembre 2002, le Canada annonçait sa ratification du Protocole de Kyoto, après un vote parlementaire favorable à la proposition du gouvernement de Jean Chrétien. Depuis, de nombreuses discussions sur le plan d'action de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) du Canada ainsi que du rôle des provinces au sein de ce plan ont eu lieu. Récemment, le Québec, depuis longtemps partisan de la ratification du Protocole de Kyoto, a publié son propre Inventaire québécois sur les émissions de gaz à effet de serre, seule province à dresser un bilan individuel de ses émissions de GES. Le bilan dont fait état cet inventaire est bien plus reluisant que celui du Canada en son ensemble. Par rapport à celle du Canada, la performance du Québec est en effet impressionnante. Les émissions de GES per capita (pc) au Québec sont de moitié inférieures à la moyenne canadienne et n'ont augmenté que de 2,3% entre 1990 et 2000, contre 19,6% pour l'ensemble du Canada (Inventaire québécois 2002).

Mais est-ce que ce bilan encourageant est à mettre sur le compte d'une politique délibérée ou est-ce que cette relative propreté est simplement le résultat de certains éléments structurels, dont les ressources hydroélectriques abondantes? Et est-ce que le bilan d'émissions de GES du Québec est toujours aussi louable lorsqu'il est comparé non pas au Canada, un des plus importants émetteurs per capita, mais à d'autres pays industrialisés aux émissions moindres? L'objectif de l'article suivant est d'examiner les raisons qui permettent au Québec de présenter un bilan d'émissions de gaz à effet de serre fort avantageux par rapport au reste du Canada, en examinant également l'évolution temporelle des tendances énergétiques et d'émissions de GES des vingt dernières années. Pour placer la performance du Québec dans un cadre comparatif plus large, nous commencerons par une comparaison des bilans Québécois et Canadien à ceux d'autres pays industrialisés. Une question importante sera la relation entre les émissions de GES, les modes de production d'énergie et l'efficacité ainsi que l'intensité énergétique des économies respectives. Un pays témoin intéressant du point de vue de sa situation géographique, de sa démographie et structure économique est la Norvège que nous comparerons plus en détail. En conclusion, le rôle du Québec au sein du plan d'action fédéral canadien sera abordé et notamment, quel crédit le Québec devrait retirer de son bilan d'émission favorable.

## Comparaison internationale

La « propreté » du Québec en ce qui a trait aux émissions de GES n'est que relative lorsqu'elle est placée dans un contexte international. Parmi les pays de l'Annexe B du Protocole de Kyoto, c'est à dire les 38 pays les plus développés, le Canada figure à la troisième place des émetteurs de GES par personne, derrière l'Australie (19 millions d'habitants), dont presque le quart des émissions proviennent de l'agriculture, et les États-Unis, et loin devant les autres pays industrialisés (tableau 1). Les émissions du Québec se situent plus ou moins dans la moyenne,

un peu en dessous de celles de la Finlande, mais supérieures à celles de l'Allemagne, la France le Royaume-Uni ou le Japon, pays qui ne possèdent pourtant pas de ressources hydroélectriques comparables au Québec bien qu'ils aient recours à d'autres sources à faible émission comme l'énergie nucléaire. Autre fait, les pays de l'Union Européenne<sup>1</sup> ont réussi à faire diminuer leurs émissions en moyenne au cours des dix dernières années tandis qu'au Québec, ces émissions ont augmenté au même rythme qu'aux États-Unis, sans pourtant atteindre le taux d'augmentation du Canada, parmi les plus élevés (figures 1 et 2).

Les réductions d'émissions particulièrement importantes de GES en Allemagne, nettement au-dessus de la moyenne européenne s'expliquent en partie par la restructuration de l'économie de l'ancienne Allemagne de l'Est. Entre 1990 et 1995, les émissions de CO<sub>2</sub> y ont baissé de 18,9 à 11,2 t CO<sub>2</sub> par personne (pc) à 11,2 tCO<sub>2</sub> pc, tandis que la diminution était moins prononcée dans l'ancienne Allemagne de l'Ouest, de 11,2 à 10,9 tCO<sub>2</sub> pc (Jahresbericht 1999). À partir de 1995, l'inventaire ne se fait plus séparément pour les parties Est et Ouest de l'Allemagne.

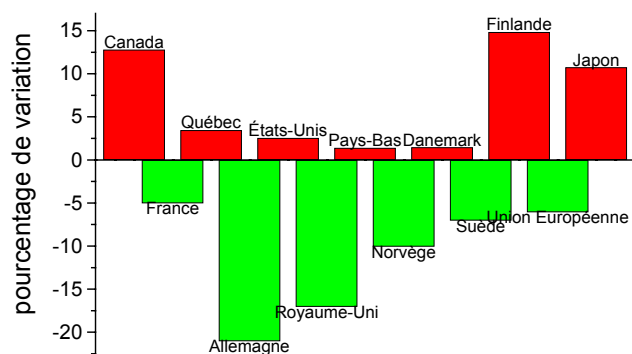


Figure 1. Variation des émissions de GES 1990-1999 de certains pays de l'annexe B. Données de Turton et Hamilton (2002) pour les pays de l'annexe B et Inventaire canadien (2002) pour le Québec.

<sup>1</sup> Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grande-Bretagne, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Suède

Pays	Population M	PIB \$/a	Émissions par personne par an		Évolution 1990-1999 %	Consommation énergétique (Intensité énergétique)		Intensité d'émissions 1999 t éq. CO <sub>2</sub> / 1000\$
			1990 t éq. CO <sub>2</sub> pc	1999 t éq. CO <sub>2</sub> pc		per capita 1998 tep pc	par PIB 1998 Tep/1000 \$	
Australie	19,0	---	26,8	25,7	- 4,1			1,19
Canada	30,5	21,3	20,3	22,9	+ 12,8	5,58	0,26	1,02
Québec	7,4	18,9	11,6	12,0	+3,4	4,72	0,25	0,65
Etats-Unis	278,2	31,5	23,6	24,2	+ 2,5	4,99	0,19	0,67
Royaume-Uni	59,5	21,1	12,9	10,7	- 17,1	2,64	0,14	0,51
France	58,6	28,2	9,9	9,4	- 5,1	2,57	0,11	0,28
Allemagne	82,1	31,7	15,2	12,0	- 21,1	2,81	0,12	0,36
Pays-Bas	15,8	30,1	14,4	14,6	+ 1,4	---	---	0,48
Danemark	5,3	37,6	13,6	13,8	+ 1,5	---	---	0,36
Suède	8,9	30,1	8,5	7,9	- 7,1	3,31	0,12	0,14
Norvège	4,5	37,2	13,9	12,5	- 10,0	4,04	0,12	0,28
Finlande	5,2	30,4	12,8	14,7	+ 14,8	---	---	0,42
Union Européenne	375,5	---	11,5	10,8	- 6,1	2,55	0,12	0,48
Japon	126,6	---	9,3	10,3	+ 10,8	2,39	0,09	0,24

Tableau 1 : Émissions par personne de pays industrialisés.

Données d'émissions de GES de Turton et Hamilton (2002) pour les pays de l'annexe B, Inventaire canadien (2002) pour le Québec, données énergétiques du ministère des Ressources naturelles (2001) sauf pour le Canada : calculé avec la consommation de 1999 (Ministère des Ressources naturelles 2001) et le PIB de l'OCDE. (OCDE 2002). Selon le MRN, le PIB/habitant du Québec est 0.88 fois celui du Canada. Le CO<sub>2</sub> résultant du changement d'affectation de terre et de foresterie n'est pas inclus, conformément aux directives du GIEC et à l'inventaire canadien.

USD de 1990, tep = tonnes d'équivalent pétrole, t éq. CO<sub>2</sub> = tonnes d'équivalent de CO<sub>2</sub>, prend en compte le pouvoir radiatif différent des gaz émis

(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC, HFC, SF<sub>6</sub>). t éq. CO<sub>2</sub> pc = tonnes d'équivalent de CO<sub>2</sub> per capita

M = millions

À l'autre extrémité de la fourchette, la forte augmentation des émissions du Canada sur la période 1990-1999 n'est égalée que par le Japon et la Finlande. Les émissions de la Finlande suivent fidèlement l'évolution de son PIB, subissant la crise du début des années 1990 (-13%) et montant en flèche depuis (+37% entre 1993 et 2000) (Statistics Finland 2002). L'économie de la Finlande dépend de secteurs particulièrement énergivores : la foresterie, l'industrie chimique et l'industrie métallurgiques, responsables de 87% des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur industriel et de 16.5 des 54 MT CO<sub>2</sub> émis par la Finlande en 1993 (Mäenpää 1998)<sup>1</sup>. Les raisons pour l'augmentation des émissions de GES du Japon sont plus difficiles à saisir. Étant donné que les années 1990 ont été marquées par une stagnation économique, reflétée dans des taux de croissance de GDP inférieurs à 1% ou même négatifs pendant toute la décennie sauf les années 1995 et 1996 (Gouvernement du Japon 2002), un status quo des émissions de GES en aurait été une conséquence plus logique. Ceci est d'ailleurs vrai pour les secteurs de l'industrie et du transport de marchandise, dont les émissions ont peu évolué entre 1990 et 1999 (-2% pour le secteur industriel). L'augmentation des émissions est due à deux secteurs, le transport (+24%), principalement l'aviation civile et les voitures personnelles, ainsi

que le secteur résidentiel et commercial (+23%), qui reflètent une évolution du style de vie des Japonais (données du Japon 2002).

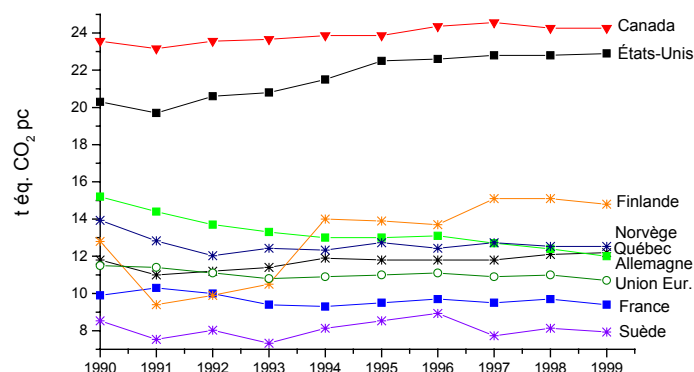


Figure 2. Évolution temporelle des émissions de GES de pays de l'annexe B. Données voir tableau 1.

<sup>1</sup> Ce total incluant la consommation d'électricité des trois secteurs.

L'intensité d'émissions dénote la quantité de GES émis pour générer 1000 \$ de PIB. Dans cette catégorie, le Québec se situe entre le Canada, très fort émetteur aussi bien par rapport à sa population qu'à son PIB et l'Union Européenne (voir figure 3). Le ratio du Québec se compare aux États-Unis, dont à la fois les émissions et le PIB sont nettement supérieurs. Par contre, sur la plan de l'intensité énergétique, c'est à dire la quantité d'énergie nécessaire pour générer le PIB (mesuré en tonnes d'équivalent de pétrole par 1000 USD de PIB), les performances du Canada et du Québec sont identiques et bien inférieures à celles de l'Union Européenne (figure 4). Les États-Unis occupent une position intermédiaire malgré une consommation énergétique per capita (pc) aussi élevée qu'au Canada, car leur PIB per capita est nettement supérieur à leur voisin du Nord. À la vue des données, il apparaît que la différence entre le Québec et le reste de l'Amérique du Nord ne réside pas dans le fait que le Québec consomme moins d'énergie que le reste de l'Amérique du Nord, mais qu'il consomme cette énergie en émettant moins de GES, ce qui est évidemment en partie le fait de l'hydroélectricité. Il sera cependant démontré plus tard que l'hydroélectricité n'est pas la seule raison expliquant les plus faibles émissions per capita du Québec par rapport à l'ensemble du Canada, mais elle reste un facteur déterminant.

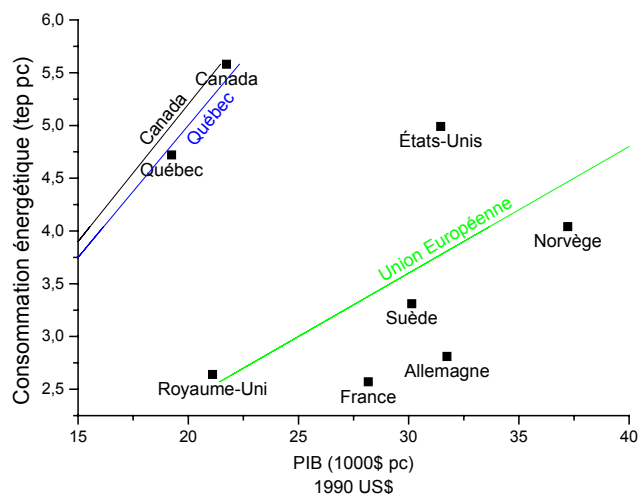


Figure 4. Intensité énergétique de pays de l'OCDE. Légende *idem* à la figure 3. Ici aussi, l'intensité énergétique augmente de bas à droite vers en haut à gauche. L'efficacité énergétique est inversement proportionnelle à l'intensité énergétique. Données voir tableau 1 et figure 3.

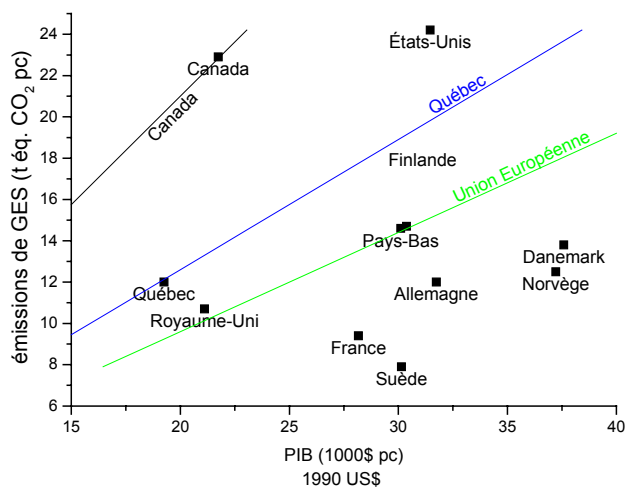


Figure 3. Intensité d'émissions de GES de certains pays de l'OCDE. Les lignes continues sont des lignes d'isointensité d'émissions de GES. L'intensité d'émissions de GES augmente d'en bas à droite vers en haut à gauche. Le Canada est le moins performant des pays présentés. Données d'émissions de Turton et Hamilton (2002) et Inventaire canadien (2002) pour le Québec, de PIB de l'OCDE (2002) et Institut de statistique du Québec (2002), converti de 1990 USD ppa (parité du pouvoir d'achat) en 1990 USD, pour le Québec.

La consommation d'énergie fossile est la principale source d'émissions de GES. Pour des pays de niveau de développement comparable, il ne serait donc pas surprenant d'observer une relation entre les émissions de GES per capita et la disponibilité d'énergie non émettrice de GES (figures 5 et 6). En effet, pour les pays européens choisis, une corrélation significative est obtenue, à la quelle seule la Finlande fait exception (voir figure 6). Les pays d'Amérique du Nord, le Canada et les États-Unis, se situent à des niveaux d'émissions considérablement plus élevés que cette régression, conséquence de la forte consommation d'énergie per capita en Amérique du Nord par rapport à l'Europe (voir aussi tableau 1). La Finlande se situe également au-dessus de la ligne de régression, mais beaucoup moins que les États-Unis ou le Canada. Le Québec, quant à lui, se situe au niveau de la Norvège, environ une tonne d'équivalent de CO<sub>2</sub> pc plus haut que la régression. Dans le cas de la Norvège, les importantes émissions liées à l'extraction de combustibles fossiles expliquent en partie la déviation de la régression (voir prochaine section).

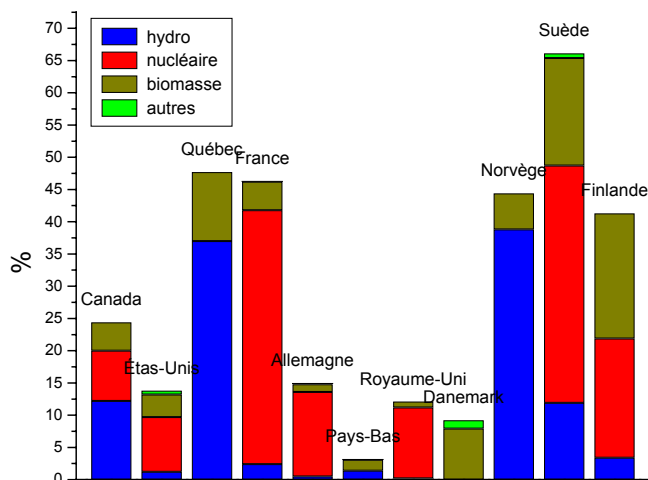


Figure 5. Part des filières non émettrices de GES dans la consommation totale d'énergie primaire de certains pays de l'OCDE. Données pour 1999 de l'OCDE (2002) et ministère des Ressources naturelles (2002) pour le Québec. Pour le Québec : autres énergies (solaire, éolienne, marémotrice, géothermale etc.) non disponibles.

### Le Québec comparé à la Norvège

La comparaison du Québec avec les pays de l'Union ne tient peut-être pas compte de spécificités du Québec comme son climat, sa démographie ou sa structure industrielle. La Norvège constitue un étalon plus approprié pour une comparaison plus poussée des bilans d'émissions de GES. La Norvège ressemble au Québec sur plusieurs plans: un vaste territoire faiblement peuplé (4,5 millions pour la Norvège, 7,4 millions pour le Québec), un climat boréal (mais à cause de la différence de latitude Montréal connaît 1280 h d'ensoleillement annuel contre 880 en Norvège) et une grande partie de l'énergie primaire fournie par l'hydroélectricité (38,8% en Norvège, 37% au Québec). La Norvège était en 2000 le 6<sup>ème</sup> producteur d'hydroélectricité au monde avec 111 TWh, néanmoins dépassé par le Québec (193,2 TWh). Dans les deux cas, plus de 99% de l'électricité est hydroélectrique. En 1998, la consommation énergétique de la Norvège par habitant (4,04 tep pc) était la plus élevée des principaux pays européens, mais restait inférieure à celle du Québec (4,72 tep pc). Les deux régions sont de grands consommateurs d'électricité. Un Norvégien consomme en moyenne 26 214 kWh par an, un Québécois 25 528 kWh par an. Les deux économies comprennent des secteurs particulièrement énergivores : transformation d'aluminium et d'autres métaux, extraction de minerais non métalliques, industrie chimique, pâtes et papiers. Une différence majeure est la présence d'un important secteur pétrolier en Norvège, grâce à ses gisements d'hydrocarbures de la mer du Nord. Malgré les importantes émissions de GES de ce secteur, qui pèsent pour 22% dans la balance des émissions norvégiennes, un norvégien émet à peu de choses près en moyenne autant qu'un québécois (12,5 t éq. CO<sub>2</sub> pc pour le premier et 12,0 t éq. CO<sub>2</sub> pc pour le second). Comment est-ce que la Norvège arrive-t-elle à quasiment égaler le Québec en dépit de ses émissions du secteur pétrolier? L'étude des bilans nationaux révèle que c'est grâce à une utilisation plus efficace des combustibles fossiles dans plusieurs secteurs.

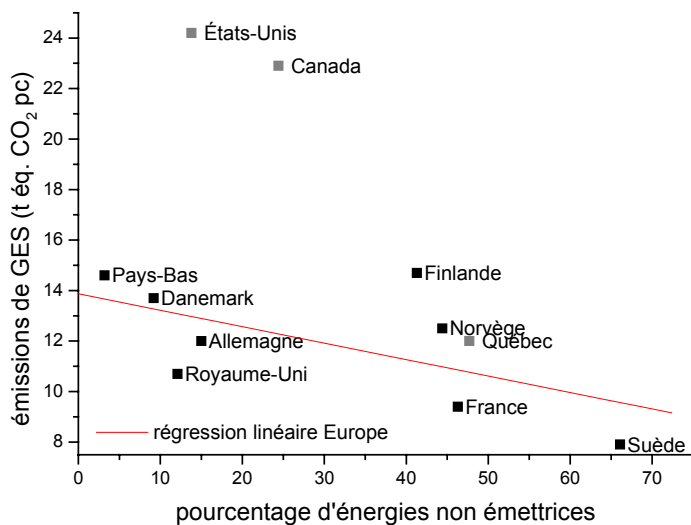


Figure 6. Relation entre le pourcentage d'énergies non émettrices et les émissions de GES per capita. La régression est faite sur les pays européens montrés.;  $Y = (13,87 \pm 1,29) - (0,065 \pm 0,035) * X$ ;  $R^2=0,36$ ,  $N = 8$ ,  $p = 0,116$ . Sans la Finlande :  $Y = (13,75 \pm 0,96) - (0,079 \pm 0,07) * X$ ;  $r^2 = 0,63$ ,  $N = 7$ ,  $p=0,032$ . Données voir tableau 1 et figure 5.

Les économies d'émissions en Norvège par rapport au Québec se font dans les secteurs du transport, de la consommation résidentielle et commerciale et dans la combustion stationnaire du domaine manufacturier (tableau 2). Dans le domaine de l'industrie (secteur manufacturier), cette utilisation moindre de combustibles fossiles contrebalance les émissions élevées du secteur chimique norvégien, liées principalement à la production de fertilisants. Dans le domaine du transport, les données détaillées montrent comment ce niveau d'émissions plus faible est atteint et ce, malgré que la flotte de pêche de la Norvège, parmi les plus grandes au monde, ajoute 10% au bilan du secteur. Les émissions des trois catégories principales de véhicules de transport de personnes et marchandises (voitures, véhicules légers, véhicules diesel lourds) sont nettement moins élevées en Norvège qu'au Québec. En revanche, les émissions des modes de transport ferroviaire, maritime et aériens sont plus élevés, ce qui indique qu'une partie importante du transport est déplacée vers des modes de transport collectifs : trains et bateau, transport en

commun dans les villes. Ce transfert est encouragé par les politiques gouvernementales et municipales. La ville de Trondheim a instauré dès 1991 un système de péage – le premier système automatisé au monde - et s'est dotée d'un réseau de transport en commun très efficace (Norwegian Public Roads Administration 2004). Le réseau ferroviaire norvégien est excellent.

Il est difficile de dire si l'efficacité énergétique supérieure de plusieurs secteurs de l'économie norvégienne est liée à la taxe sur le CO<sub>2</sub> imposée en Norvège depuis 1991 et qui rapporte environ 3 milliards de NOK (couronnes norvégiennes, 411 millions USD) par an (Norwegian Petroleum Directorate 2002). Le fait que la Norvège ait réduit ses émissions de 10% depuis 1990 (7% en Suède, autre pays imposant une taxe sur le CO<sub>2</sub>) plaiderait en ce sens. Quoi qu'il en soit, il est de toutes manières évident que la consommation de combustibles fossiles possède une certaine élasticité par rapport à leur prix. Cette élasticité est estimée à 0,5 pour une taxe globale et 0,25 pour une taxe nationale dans un petit pays (Hennicke et Ramesohl 1998). Une taxe représente donc un incitatif économique efficace pour la modération de la consommation, pour la substitution de combustibles fossiles par des sources d'énergie plus propres et la recherche dans des procédés énergétiquement plus efficaces. Onze pays (Danemark, Suède, Norvège, Finlande, Pays-Bas, Suisse, Allemagne, Royaume-Uni, France, Italie et République Tchèque) imposent des taxes sur le CO<sub>2</sub> ou l'énergie avec des taux d'imposition variant de 19 USD/tCO<sub>2</sub> en Finlande à 123 USD/tCO<sub>2</sub> en Suisse (Pershing 2000, Brännlund et Kriström 1997). Dans le cas du Danemark, la taxe d'environ 100 DKR (couronnes danoises, 14,5 USD) par tCO<sub>2</sub> introduit en 1993 a permis de réduire les émissions du secteur industriel de 4% sans pour autant provoquer de pertes d'emplois (Hennicke et Ramesohl 1998, Steen 1999).

### Le Québec par rapport au Canada

Comme l'indique la section précédente, la performance du Québec en matière d'émissions de gaz à effet de serre ne se démarque pas particulièrement au plan international. Il reste qu'elle est nettement supérieure à celle du Canada. Et tout ne s'explique pas par l'hydroélectricité. Comme peut le montrer une étude plus approfondie des inventaires canadien et québécois des émissions de GES, d'autres secteurs que la production d'électricité contribuent à la bonne performance du Québec au sein du Canada<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Ici, uniquement les données de l'inventaire canadien ont été utilisées puisque celui du Québec ne contient pas de données relatives aux autres provinces. Les données ne sont pas calculées de la même façon dans les deux inventaires. Ainsi, les émissions totales sont de 90,4 Mt éq. CO<sub>2</sub> selon le document fédéral, mais seulement 88,34 Mt éq. CO<sub>2</sub> selon l'inventaire québécois.

Secteur	Émissions (Mt éq. CO <sub>2</sub> pc)	
	Norvège	Québec
Industrie des combustibles fossiles	2,74	0,55
Autres industries et production d'électricité	3,46	3,48
Consommation résidentielle et commerciale	0,31	1,59
Transports	3,44	4,54
Agriculture	1,19	1,04
Déchets	0,93	0,91
<b>Total</b>	<b>12,06</b>	<b>12,25</b>
Détails du transport		
Voitures	1,13	1,73
Véhicules légers	0,31	0,81
	0,60	1,24
Transport maritime, ferroviaire, maritime	0,76	0,55
Pêche	0,33	-
Autres	0,31	0,21
Détail des autres industries et production d'électricité		
Combustion stationnaire		
Secteur minier	0,20	0,12
Secteur manufacturier, construction et autres	1,07	1,56
Processus industriels		
Produits minéraux non métalliques	0,20	0,25
Produits chimiques	0,36	0,00
Produits métalliques (Fe, Al, Mg, etc.)	1,20	1,35
Autres produits et solvants	0,07	0,19

Tableau 2. Émissions par secteur. Données de 1996 pour la Norvège (Inventaire norvégien 2000), de 2000 pour le Québec (Inventaire canadien 2002). Les émissions globales norvégiennes étaient 0,8% inférieures en 1996 par rapport à 1999, celles du Québec 2% supérieures en 2000 par rapport à 1999.

Les émissions par habitant au Canada en 2000 varient grandement selon les provinces (tableau 3), s'échelonnant de 12,2 t éq. CO<sub>2</sub> pc au Québec à 74,1 en Alberta (presque trois fois celles de l'Australie, peu enviable champion international dans cette discipline), ce qui reflète des modes énergétiques et économiques différents. Sans le Québec, les émissions de GES par personne au Canada grimperaient de 23,6 à 27,2 et sans l'Alberta, elles chuteraient à 18,1 t éq. CO<sub>2</sub> pc. Comme le montre le tableau 3, le Québec figure en dessous de la moyenne canadienne dans presque tous les secteurs. Les 11 tonnes de CO<sub>2</sub> de moins qu'émet un québécois par rapport à un canadien moyen se ventilent comme suit : production d'électricité 4,08, industries des combustibles fossiles et émissions fugitives 3,37, transport 1,63, consommation commerciale et résidentielle 0,91, agriculture 0,91, autres industries 0,47. Les déchets sont le seul secteur pour lequel le Québec affiche un léger déficit. Dans les paragraphes suivants, les facteurs permettant au Québec d'émettre moins de GES que la moyenne du Canada seront analysés.

	Population (Mio)	Industries fossiles+	Autres Industries*	Production d'Électricité	Commercial et résidentiel	Transport	Agriculture	Déchets	Total
<b>T éq. CO<sub>2</sub> pc</b>									
Canada	30,79	3,92	3,87	4,16	2,50	6,17	1,95	0,78	23,58
Ontario	11,70	0,71	3,55	3,45	2,70	5,46	0,94	0,71	17,70
Québec	7,38	0,55	3,40	0,08	1,59	4,54	1,04	0,91	12,25
C.-B.	4,06	2,37	2,76	0,56	1,92	6,48	0,62	1,23	16,23
Alberta	3,01	26,05	9,21	16,94	4,34	10,30	6,31	0,40	74,09
Manitoba	1,15	0,46	1,48	0,86	2,68	6,48	6,02	0,52	18,67
Sask.	1,02	15,07	4,97	14,19	3,61	10,96	10,76	0,60	60,47

Tableau 3 : Émissions par personne et par secteur au Canada. Données de l'Inventaire canadien (2002).<sup>+</sup>

regroupe industrie des combustibles fossiles et émissions fugitives

\* regroupe secteurs minier, manufacturier et de la construction

*Hydroélectricité*

Les secteurs québécois de la production d'électricité et de la consommation résidentielle et commerciale, essentiellement le chauffage des bâtiments, profitent de l'absence d'émissions comptabilisées pour l'énergie hydroélectrique, puisque 99% de l'électricité est générée par les barrages et que 68% des logements sont chauffés à l'électricité. Les émissions de ces deux secteurs sont ainsi réduites de 4,99 t éq. CO<sub>2</sub> pc par rapport à la moyenne canadienne grâce au recours à l'énergie bleue. En fait, l'économie d'émissions dépasse ce chiffre puisque certaines industries, en particulier les alumineries, grosses consommatrices d'énergie, utilisent également l'hydroélectricité. Ainsi, parmi les 31 centrales (sans les chutes Churchill et SM-3) de plus de 200 MW au Québec, 6 appartiennent à l'Alcan Aluminium Ltée, totalisant une puissance installée de 2 687 MW, soit la moitié de la centrale Robert-Bourassa. Abitibi-Consolidated opère sept centrales hydroélectriques, cependant plus modestes. Si ces industries avaient recours à de l'énergie fossile, le bilan d'émissions de GES du secteur industriel en serait d'autant alourdi.

Ces données n'incluent pas les émissions de GES de nos réservoirs hydroélectriques, dont l'inventaire québécois des gaz à effet de serre dit qu'« *elles ne sont pas considérées dans cet inventaire, car les facteurs d'émission applicables au Québec comme ailleurs dans le monde ne sont pas connus pour l'instant* » (Inventaire québécois 2002). Il est néanmoins possible d'estimer l'amplitude de ces émissions en utilisant des chiffres publiés par Hydro-Québec<sup>1</sup>, semblables à ceux d'autres études en milieu boréal (Duchemin *et al.* 2002, Duchemin, 2001, St. Louis *et al.* 2000). Selon ces données, les émissions des réservoirs pourraient s'établir entre 30 et 50 g éq. CO<sub>2</sub>/kWh, ce qui équivaldrait à 5 à 8 Mt éq. CO<sub>2</sub>, si ce facteur était appliqué à toute la production d'électricité de 171,207 TWh en 1999 (MRN 2001, sans compter les chutes Churchill). Cela représenterait entre 0,7 et 1,2 t éq. CO<sub>2</sub> pc, soit de 5,6 à 9,6% des émissions totales du Québec. Un tel chiffre reste cependant incertain puisqu'il provient de mesures faites sur un nombre limité de réservoirs que plusieurs hypothèses peuvent entrer dans le calcul du facteur d'émissions. Au-delà des émissions mesurées à la surface des réservoirs par plusieurs groupes de recherche dans plusieurs régions boréales (Duchemin *et al.* 2002, Duchemin, 2001, St. Louis *et al.* 2000, Gagnon et van de Vate 1997) et de la surface spécifique (km<sup>2</sup> inondés par kWh d'énergie) il faut prendre en compte le cycle du carbone, notamment des facteurs comme les émissions du territoire avant la construction du barrage, l'origine du carbone émis en tant que CO<sub>2</sub> et les altérations du système écologique et la durée projetée des émissions (Gagnon et Varfalvy 2000, Weissenberger *et al.* 1998, Gagnon et van de Vate 1997). Selon les directives actuelles du

<sup>1</sup> 33 kt éq. CO<sub>2</sub>/TWh pour le complexe La Grande (Gagnon et Varfalvy 2000); 15 ou 34 gCO<sub>2</sub>/kWh, selon que les émissions reviennent à zéro après 50 ans ou non (Gagnon et van de Vate 1997); 31 000 t/TWh (Chamberland *et al.* 1996).

GIEC, ce type d'émissions n'a pour l'instant pas à être comptabilisé dans les inventaires nationaux de GES, malgré la reconnaissance de la présence des émissions de réservoirs ("*Hydropower is not free of GHG emissions.*", IPCC/GIEC 1995). Il semble vraisemblable que dans l'avenir, les émissions des réservoirs (hydroélectriques ou autres), soient incluses dans les inventaires nationaux sous la rubrique « Affectation des terres, Changement d'affectation des terres et Forêt » (É. Duchemin, comm. pers.<sup>2</sup>). Cette éventualité advenant, une méthodologie de calcul de facteurs d'émissions précise et standardisée sera élaborée. Il est important de noter que ces émissions de GES ne représentent qu'une fraction de celles qui seraient occasionnées si la même quantité d'électricité était générée par des centrales thermiques.

*Industries des combustibles fossiles et émissions fugitives, agriculture*

Deux autres facteurs structurels contribuent à différencier le Québec de la moyenne du Canada. Le premier est la rareté des ressources pétrolières, charbon, gaz naturel ou sables bitumineux dont l'extraction est hautement émettrice de GES. Ces émissions, originaires à 65% de l'Alberta, représentent 3,92 t éq. CO<sub>2</sub> pc au niveau du Canada, soit 3,37 t éq. CO<sub>2</sub> pc de plus qu'au Québec (0,55 t éq. CO<sub>2</sub> pc).

Le deuxième est le secteur agricole, qui émet moins de GES au Québec que dans le reste du Canada. Les principales sources d'émissions de GES dans le domaine agricole au Canada sont le CH<sub>4</sub> imputable à l'élevage de bétail, principalement dans les provinces de l'Alberta, du Manitoba et de la Saskatchewan, et le N<sub>2</sub>O émis par les sols agricoles. Ce dernier représente, rien que pour la Saskatchewan, autant d'émissions de GES que toutes les émissions agricoles du Québec, pourtant sept fois plus peuplé. Le domaine agricole fait grimper la moyenne canadienne à 0,9 t éq. CO<sub>2</sub> pc au-dessus des émissions québécoises.

*Transport*

Cependant, le Québec ne fait pas uniquement mieux que le reste du Canada pour les secteurs où il est avantagé par la géographie ou la géologie, mais aussi dans le domaine du transport qui relève en grande partie des habitudes et du mode de vie de la population. Les émissions du Québec dans ce secteur sont les moins élevées de toutes les provinces canadiennes. Elles se situent 1,63 t éq. CO<sub>2</sub> pc en dessous de la moyenne du pays. De cette différence, 1,29 t éq. CO<sub>2</sub> pc sont attribuables aux différentes catégories de véhicules et 0,35 t éq. CO<sub>2</sub> pc à l'absence d'oléoducs ou gazoducs, qui sont également comptabilisés dans ce secteur. Pour ce qui est des véhicules, il est à remarquer que les Québécois semblent avoir un penchant beaucoup plus faible pour les camionnettes légères

<sup>2</sup> É. Duchemin est *auteur principal* dans le cadre de l'élaboration du « Good Practice Guidance in Land-Use, Land-Use Change and Forestry », 2003



(fourgonnettes familiales, sports utilitaires, etc.) au profit des voitures à essence. Celles-ci émettent 40% de moins de GES par km, ce qui permet à un Québécois d'émettre en moyenne 0,2 t éq. CO<sub>2</sub> de moins qu'un Canadien pour ces deux catégories de véhicules additionnés. Ce chiffre augmente à 0,35 t éq. CO<sub>2</sub> quand les véhicules à essence tout-terrain (4 roues, motoneiges, tondeuses, etc.) sont inclus. Le transport de marchandises par véhicules poids lourds à essence ou diesel est lui aussi une moindre source d'émissions de GES au Québec qu'au Canada, la différence se chiffrant à 0,17 t éq. CO<sub>2</sub> pc pour ces deux catégories, ce qui est surtout attribuable aux émissions de l'Alberta et de la Saskatchewan, presque deux fois au-dessus de la moyenne canadienne. Les transports maritime, ferroviaire et aérien émettent 0,28 t éq. CO<sub>2</sub> pc de moins au Québec qu'au Canada. En plus de ces différents modes de transport de passagers et marchandise, une grande partie de la différence entre le Québec et la moyenne canadienne s'explique par les usages industriels, dont les émissions de véhicules diesel tout-terrain (différence de 0,47 t éq. CO<sub>2</sub> pc), utilisés entre autre dans les industries minières, forestières, agricoles et de la construction. Les émissions des véhicules tout-terrain diesel sont partout plus élevées qu'au Québec, mais particulièrement en Alberta et Saskatchewan, où elles se situent deux fois au-dessus de la moyenne canadienne. La catégorie des véhicules diesel tout-terrain est évidemment reliée à la structure spécifique de l'économie des provinces respectives et surtout à l'exploitation des ressources naturelles.

En résumé, le secteur des transports émet 1,63 t éq. CO<sub>2</sub> pc de moins que la moyenne canadienne, dont 0,39 sont attribuables au transport routier de personnes et aux usages récréatifs, 0,17 au transport routier de marchandises, 0,28 aux modes de transport non-routiers et 0,82 aux activités que l'on pourrait classer comme industrielles (véhicules diesel tout-terrain, gazoducs et oléoducs).

#### Bilan Québec-Canada

Après analyse, les « économies » d'émissions de GES (11 t éq. CO<sub>2</sub> pc) du Québec par rapport à la moyenne canadienne peuvent être regroupées selon cinq catégories causales (voir figure 7). Ces catégories ne regroupent pas les émissions selon les sources telles que définies dans les inventaires de GES, mais selon les types d'activités humaines qui en sont à l'origine.

- 1) Énergie hydroélectrique – production d'électricité (4,08 t éq. CO<sub>2</sub> pc) et consommation résidentielle et commerciale (0,91 t éq. CO<sub>2</sub> pc)
- 2) Absence d'industrie de combustibles fossiles et des émissions fugitives (3,37 t éq. CO<sub>2</sub> pc) ainsi que du transport par oléoducs ou gazoducs (0,35 t éq. CO<sub>2</sub> pc)
- 3) Agriculture moins génératrice d'émissions de GES (0,91 t éq. CO<sub>2</sub> pc)
- 4) Transport de personnes et marchandises sur terre, air et mer (0,80 t éq. CO<sub>2</sub> pc)

- 5) Autres industries (0,47 t éq. CO<sub>2</sub> pc) et véhicules diesel tout-terrain (0,47 t éq. CO<sub>2</sub> pc)

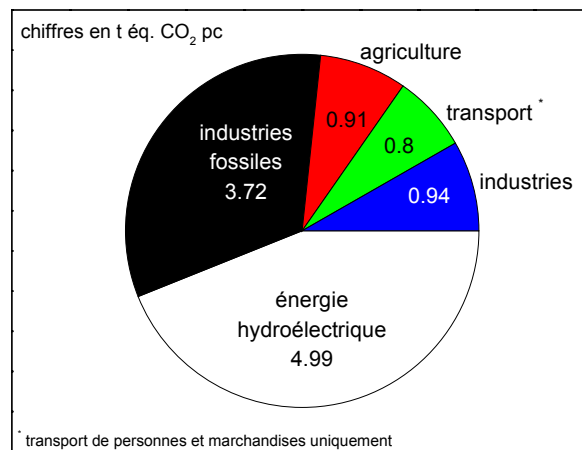


Figure 7. Répartition du déficit d'émissions du Québec par rapport à la moyenne du Canada. Le total est de 11 t éq. CO<sub>2</sub> pc. Données de l'Inventaire canadien (2002). Le regroupement des secteurs diffère de l'inventaire canadien, détails dans le texte.

#### Le Québec dans le temps

Après avoir constaté que le Québec émet moins de GES par personne que le Canada dans plusieurs secteurs, il serait intéressant de retracer l'évolution temporelle des émissions dans cette province et s'interroger sur les raisons qui mènent à ces émissions plus faibles, pour les secteurs qui peuvent être directement influencés par l'action politique ou les comportements individuels ou collectifs. Non seulement, le Québec émet moins de GES que la moyenne canadienne, mais ses émissions ont aussi moins augmenté entre 1990 et 2000 (tableaux 4 et 5).

Parmi les secteurs pouvant afficher des réductions d'émissions depuis 1990 figure l'industrie et en particulier les industries de l'aluminium et du magnésium. On peut y voir une réussite des politiques axées sur le volontariat mises en place par le gouvernement. En effet, l'Association de l'Aluminium du Canada (AAC, représentant Alcan Inc., Alcoa et les Aluminerie Alouette) ont signé le 31.1.2002 une entente volontaire avec le ministère de l'Environnement s'engageant à réduire leurs émissions de GES de 200 kt éq. CO<sub>2</sub> d'ici 2007 (AAC 2002) et ces entreprises ont auparavant participé au programme ÉcoGESTe<sup>3</sup>. Ces alumineries

<sup>3</sup> Le programme ÉcoGESTe, l'un des éléments importants du Plan d'action québécois sur les changements climatiques est un programme conjoint du ministère de l'Environnement et du ministère des Ressources naturelles du Québec, consistant à enregistrer les mesures volontaires prises par les organismes et les entreprises du Québec pour diminuer leurs émissions de GES.

ont réussi à presque stabiliser leurs émissions de GES depuis 1990, tout en augmentant de 62,7 % leur production, réduisant au passage l'intensité de GES de 5,1 à 3,4 tonnes par tonne d'aluminium, une réduction de 36% (AAC 2002). Ceci est rendu possible grâce à des améliorations dans les techniques de production menant à de plus faibles émissions de CF<sub>4</sub> et C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, deux puissants GES. En même temps, au niveau global, une étude du *International Aluminium Institute* (IAI 2001) démontre que les émissions de GES ont chuté de 117 à 92 Mt CO<sub>2</sub> entre 1990 et 2000, tandis que la production mondiale augmentait de 24%, ce qui implique une diminution de l'intensité de GES de 37%, presque exactement ce que l'on retrouve au Québec. L'influence des mesures volontaires et du programme ÉcoGESTe est donc indiscernable du simple scénario du laisser-faire. Selon les prévisions de l'*International Aluminium Institute* (IAI 2001), il existe encore un grand potentiel d'amélioration des techniques de production en ce qui concerne les émissions GES, ce qui représente une bonne nouvelle pour le Québec, qui peut s'attendre à de nouvelles baisses d'émissions (à production égale bien entendu) au fur et à mesure que les usines seront modernisées.

La situation est semblable dans le cas de l'industrie du magnésium dont les émissions de SF<sub>6</sub> sont passées de 2,9 à 2,3 Mt éq. CO<sub>2</sub> entre 1990 et 2000, grâce à une réduction de 70% des émissions d'une entreprise norvégienne, Norsk Hydro, propriétaire de l'usine de Bécancour. Au passage, Norsk Hydro réduisait l'ensemble des émissions du Québec de 2%, lui valant le premier rang au sein des 70 entreprises souscrivant au programme ÉcoGESTe en 1997 (MEF et MRN 1998). Avant l'ouverture de l'usine Magnolia de Noranda Magnesium en 2000, les émissions de l'industrie de l'aluminium étaient tombées à 0,90 Mt éq. CO<sub>2</sub> malgré une hausse de la production. En même temps, en Norvège, les émissions de SF<sub>6</sub> ont baissé de 80%, ce qui est peu surprenant, puisque Norsk Hydro y est également le producteur principal (Inventaire norvégien 2000). En revanche, les émissions de SF<sub>6</sub> de l'Ontario (Timminco Metals) sont restées inchangées (Inventaire canadien 2002). D'ici quelques années, aussi bien Norsk-Hydro que Noranda Magnesium cesseront d'utiliser le SF<sub>6</sub>, ce qui devrait abaisser de nouveau de façon appréciable les émissions québécoises (Inventaire norvégien 2000, Bergeron 1999). Ici aussi, les réductions d'émissions de GES découlent de l'adoption de standards internationaux et il n'est pas possible d'affirmer qu'ÉcoGESTe ou des autres politiques gouvernementales y sont pour quelque chose.

Les émissions du secteur des déchets ont diminué de 0,79 Mt CO<sub>2</sub>, soit de 13,3% grâce au captage et à la combustion de

Depuis 1996, ÉcoGESTe a enregistré les mesures de réduction de GES de plus de 265 participants, dont une centaine sont des entreprises du secteur industriel. À la fin de l'an 2000, l'action des partenaires d'ÉcoGESTe avait permis d'éviter l'émission d'au moins 76 millions de tonnes de gaz à effet de serre au cours de la dernière décennie (Ministère de l'Environnement du Québec 2003).

méthane (CH<sub>4</sub>). Cet exemple montre que la réduction des émissions de GES peut avoir d'autres bénéfices, puisque d'une part, le méthane est un gaz nocif et que d'autre part sa combustion libère une importante quantité d'énergie pouvant être captée. Présentement, seulement 10 lieux d'enfouissement municipaux sur 480 brûlent le méthane, avec ou sans récupération d'énergie, ce qui ne représente que 30% des biogaz émis. Il est à noter que les chiffres fournis par le ministère de l'Environnement du Québec (Inventaire québécois 2002) diffèrent considérablement de ceux fournis par Environnement Canada pour l'année 2000 (Inventaire canadien 2002) sans que les précisions fournies permettent d'expliquer l'origine de cette différence (tableaux 4 et 5). Tandis que le MEQ estime les émissions de GES reliées à l'enfouissement des déchets en 2000 à 5,16 Mt éq. CO<sub>2</sub>, Environnement Canada les place à 6,7 Mt éq. CO<sub>2</sub>, soit une augmentation de 15,5% au lieu d'une diminution de 13,3% par rapport à l'année 1990, pour laquelle les chiffres du MEQ et d'Environnement Canada sont semblables.

Secteur	Émissions en 1990 (Mt éq. CO <sub>2</sub> )	Émissions en 2000 (Mt éq. CO <sub>2</sub> )	Variation absolue (Mt éq. CO <sub>2</sub> )	Variation pourcentile
Industrie <sup>1</sup>	30,3	28,9	- 1,4	- 4,5%
Génération d'électricité	1,45	0,37	- 1,08	- 74,5%
Consommation résidentielle et commerciale	11,1	11,8	+ 0,7	- 6,2%
Transports	29,3	33,6	+ 4,3	+ 14,7%
Agriculture	8,21	8,37	+ 0,16	+ 1,9%
Déchets	5,95	5,16	- 0,79	- 13,3%
Total	86,6	88,3	+ 1,7	+ 1,9%

Tableau 4. Évolution des émissions du Québec entre 1990 et 2000 par secteur selon l'Inventaire québécois (2002). <sup>1</sup> regroupe combustion industrielle, autres combustions, procédés industriels, solvants et autres produits, raffinage de pétrole et émissions fugitives

Il est intéressant d'élargir l'horizon temporel en-deça de l'année de référence 1990 pour étudier les évolutions sur une plus longue période. Il apparaît alors que dans certains secteurs, une évolution plus marquée vers l'efficacité énergétique avait eu lieu entre les années 1979 à 1990, avant la ratification du Protocole de Kyoto qu'après sa ratification, sur un fond de prix de pétrole croissants. Trois exemples révélateurs de cette évolution sont le secteur des transports, le secteur industriel et la conversion du chauffage résidentiel et commercial à l'électrique (tableau 6). Entre 1978 et 1985, alors que le prix du pétrole brut importé au Québec augmentait considérablement, ces trois secteurs, de même que les émissions cumulées du Québec, affichaient une baisse d'émission prononcée (figures 8a-8d, tableau 6). Ce mouvement a cessé par la suite lorsque le prix du pétrole s'est rétabli à un niveau moins élevé.

Secteur	Émissions en 1990 (Mt éq. CO <sub>2</sub> )	Émissions en 2000 (Mt éq. CO <sub>2</sub> )	Variation absolue (Mt éq. CO <sub>2</sub> )	Variation pourcentile
Industrie <sup>1</sup>	30,2	30,5	+ 0,3	+ 0,9%
Production d'électricité et de chaleur	1,51	0,58	- 0,93	- 61,6%
Consommation résidentielle et commerciale	11,3	11,7	+ 0,4	+ 3,9%
Transports	29,3	33,5	+ 4,2	+ 14,3%
Agriculture	8,0	7,7	- 0,3	- 3,8%
Déchets	5,8	6,7	+ 0,9	+ 15,5%
Total	86,1	90,4	+ 4,3	+ 5,0%

Tableau 5. Évolution des émissions du Québec entre 1990 et 2000 par secteurs selon l'Inventaire canadien (2002). <sup>1</sup> regroupe secteurs miniers, manufacturier, construction et autres combustions, procédés industriels, solvants et autres produits, industries des combustibles fossiles et émissions fugitives

La consommation d'essence dans le domaine des transports, et en conséquence les émissions de CO<sub>2</sub>, après avoir baissé de 27% entre 1979 et 1983, sont en 2000 revenues presque exactement à leur niveau de 1979 (figure 8a). Suivant la même logique, la recherche d'efficacité énergétique des industries déclina fortement après 1987. De 1979 à 1989, l'intensité énergétique est passée de 0,34 à 0,28 tep/1000CAD, soit une baisse de 17%. Dans les dix années suivantes, la baisse n'a été que de 1,8%, un dixième de la décennie précédente.

Reflétant encore la même évolution, la conversion du chauffage résidentiel et commercial à l'électricité a entraîné une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> dans ces secteurs de 42% entre 1979 et 1987. Par la suite, le programme de conversion a stagné et l'augmentation de l'importance du mazout dans le chauffage commercial a occulté les gains de conversion de logements résidentiels à l'électricité, de sorte que les émissions de CO<sub>2</sub> ont marginalement augmenté de 3% (figure 8c).

De même manière que l'efficacité énergétique des secteurs industriel et commercial, les dépenses énergétiques des ménages reflètent fidèlement le cours du pétrole. La consommation résidentielle a chuté de 3,44 tep par ménage en 1979 à 2,49 tep par ménage en 1989 (-28%) et à 2,14 tep par ménage en 1999 (-14% par rapport à 1989). La consommation énergétique du transport a chuté de 5,06 tep par ménage en 1979 à 3,69 tep par ménage en 1989 (-27%), mais a légèrement augmenté dans la décennie suivante à 3,78 tep par ménage en 1999. Le déclin de la recherche d'efficacité énergétique au Québec se traduit aussi dans les investissements dans le domaine de l'énergie, dont la part dédiée aux investissements en efficacité énergétique dépassait 20% entre 1987 et 1996, mais n'était plus que de 9,3%

en 1998. Les investissements dans les énergies renouvelables ont diminué de moitié entre 1987 et 1998 et ne représentent plus que 2,2% des investissements énergétiques totaux, contre 6,1% en 1987 (MRN 2001).

Le prix du pétrole s'avère donc un régulateur d'émissions de CO<sub>2</sub> apparemment beaucoup plus puissant que les politiques gouvernementales appliquées depuis la signature de la charte de Rio et du Protocole de Kyoto, ce qui suggère qu'une taxe sur les combustibles fossiles ou directement sur les émissions, telle que pratiquée depuis peu en Allemagne et d'autres pays, constitue le moyen le plus efficace de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et de stimuler la recherche en efficacité énergétique. Il est faux de croire qu'une telle évolution serait coûteuse du point de vue du PIB ou de pertes emplois. Les expériences de pays européens ayant introduit une taxation sur les émissions ou les combustibles fossiles tendent à démontrer le contraire. Le lien entre consommation d'énergie et création d'emploi est également questionnable. Au Québec, la reprise de la consommation énergétique suite au choc pétrolier n'a pas généré d'emplois directs. Au contraire, le secteur énergétique comptait 41900 emplois en 1999, 9000 de moins qu'en 1993 (MRN 2001). Le nombre d'emplois dans la distribution de produits pétroliers a chuté de 30718 en 1979 à 21200 en 1993, suite au choc pétrolier, mais a continué de décroître jusqu'à 17800 en 1999 malgré le rétablissement des cours pétroliers. Le nombre d'emplois dans le secteur électrique a connu une augmentation de 17744 entre 1979 et 1993, mais a également diminué à 20328 en 1999 (MRN 2001), malgré une production en augmentation constante.

La réduction de l'intensité énergétique ne doit pas être perçue comme une simple réduction de la consommation ou une restriction des activités domestiques et économiques, mais comme une transition vers une efficacité accrue des procédés, qui engendre de nouveaux développements technologiques et une croissance dans plusieurs secteurs comme les énergies renouvelables ou les économies d'énergie, qui sont tout autant et souvent plus génératrices de revenus que les filières basées sur une consommation plus intense de combustibles fossiles.

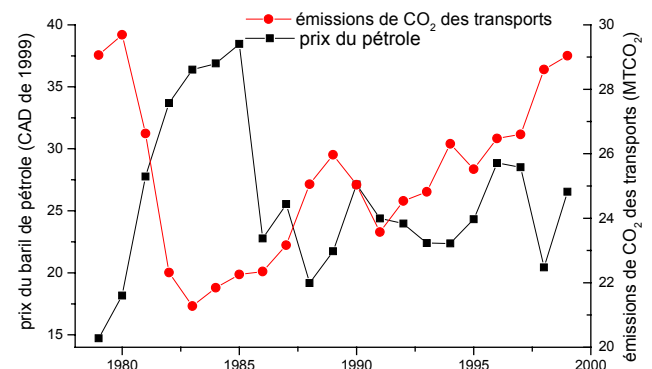


Figure 8a. Prix du pétrole brut livré au Québec et émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports entre 1979 et 1999. Données MRN (2001)

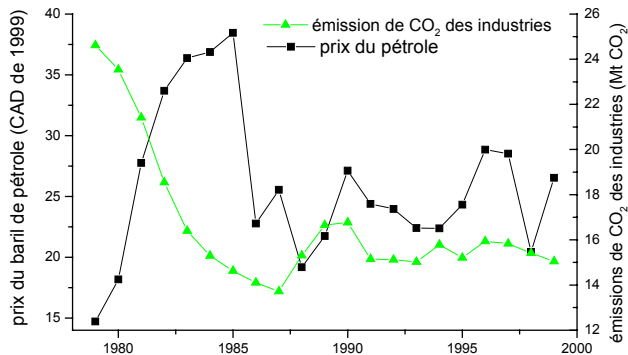


Figure 8b. Prix du pétrole brut livré au Québec et émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des industries entre 1979 et 1999. Données MRN (2001)

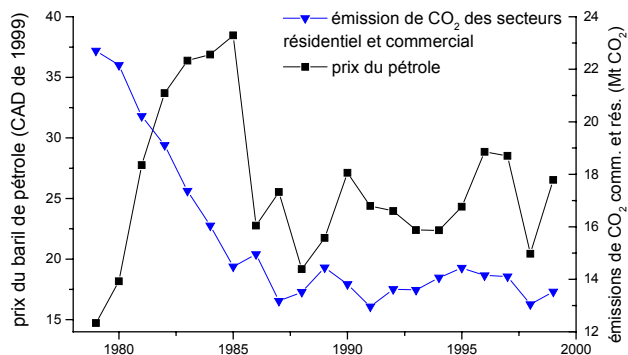


Figure 8c. Prix du pétrole brut livré au Québec et émissions de CO<sub>2</sub> des secteurs résidentiel et commercial entre 1979 et 1999. Données MRN (2001)

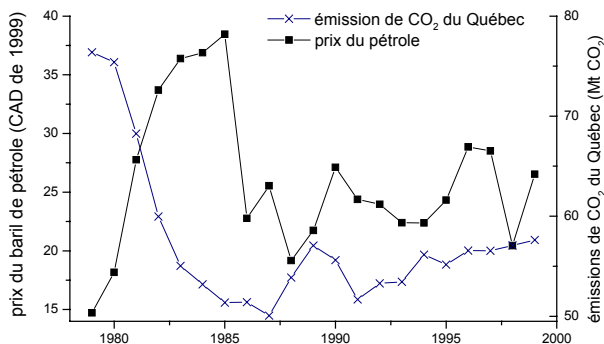


Figure 8d. Prix du pétrole brut livré au Québec et émissions totales de CO<sub>2</sub> du Québec entre 1979 et 1999. Données MRN (2001)

### Conclusion

En conclusion, dans le domaine des émissions de GES, le Québec fait bien mieux que moyenne du Canada, sans être très loin de provinces comme l'Ontario ou la Colombie-Britannique, mais bien devant la Saskatchewan ou de l'Alberta. Les émissions de l'Alberta, province de 3 millions d'habitants, dépassent largement celles de pays développés plusieurs fois plus peuplés comme la Belgique (10,2 millions d'habitants), la Grèce (10,5), ou l'Autriche (8,1), et sont presque égales à celles des Pays-Bas (15,8). Le bilan positif du Québec par rapport au reste du Canada s'explique en grande partie par le recours à l'hydroélectricité et l'absence d'exploitation de ressources en combustible fossiles (77% de la différence), mais les autres émissions des autres secteurs sauf les déchets sont également moins élevées que la moyenne canadienne. En revanche, par rapport à d'autres pays au contexte structurel et géographique comparable, le Québec ne s'illustre pas particulièrement dans le dossier des émissions de GES. Il est difficile d'affirmer que le bilan positif par rapport au reste du Canada relève d'une volonté politique, de programmes comme ÉcoGeste, des mesures volontaires ou d'une « conscience climatique » plus développée. La comparaison avec d'autres pays industrialisés démontre qu'il reste encore une marge importante pour réduire les émissions de GES et ce, en maintenant, voir en améliorant le niveau de vie et le PIB.

Il est vrai que le Québec, à l'instar du Canada, dépend à un degré considérable et supérieur à la plupart des autres pays industrialisés d'industries grandes consommatrices d'énergie. Le Québec fournit 44% des pâtes et papiers au Canada et 11% du papier journal au niveau mondial. La production d'aluminium représente 10% de la production mondiale. La sidérurgie, le ciment et industrie chimique représentent 10% de la valeur ajoutée<sup>4</sup>, 29% des exportations internationales et 10% de la main d'œuvre au Québec. Cependant, d'autres pays fortement industrialisés et dépendants de ressources, ont aussi été en mesure de garder ou ramener leurs émissions à des niveaux moins élevés que le Québec. De plus, avec les ressources hydroélectriques considérables du Québec, il lui est possible de générer une grande partie l'énergie utilisée dans ces filières intensives en énergie sans émettre de GES. Ainsi, Alcan Aluminium ltée dispose de six grands barrages et d'une puissance installée de 2 687 MW (7% de la puissance installée au Québec).

<sup>4</sup> La valeur ajoutée se définit comme la différence entre la valeur de la production et celle des consommations intermédiaires (biens et services utilisés pour la production) et correspond à la richesse créée.

Année	Prix du pétrole CAD courrant	Émissions de CO <sub>2</sub> (Mt CO <sub>2</sub> )					
		Transport	Industriel	Résidentiel et commercial	Résidentiel	Commercial	Total
1979	14,72	29,06	24,62	22,71	14,88	7,83	76,39
1989	27,12	25,04	16,77	13,81	7,13	6,68	55,62
1999	26,53	29,04	15,05	13,53	5,96	7,57	57,62
1979-1989	+12,4 (84%)	-4,02 (14%)	-7,85 (32%)	-8,90 (39%)	-7,75 (52%)	-1,15 (15%)	-20,77 (27%)
1989-1999	-0,59 (2%)	+4,00 (16%)	-1,72 (10%)	-0,28 (2%)	-1,17 (16%)	+0,89 (13%)	+2,00 (4%)

Tableau 6. Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> entre 1979 et 1999. Données MRN (2001).

Plus que par une substitution de combustibles fossiles en faveur de l'hydroélectricité, la réduction des émissions de GES du Québec, ainsi que du Canada, doit prioritairement être atteinte par la promotion de l'efficacité énergétique, qui est nettement inférieure à celles des pays européens ou du Japon. La Norvège est un bon exemple puisque son économie est basée en grande partie sur les mêmes ressources naturelles, son potentiel hydroélectrique est proche de celui du Québec et que le climat y est similaire. Les émissions de GES pc de la Norvège sont presque identiques à celles du Québec. Comme 22% proviennent de l'exploitation des ressources pétrolières, cela implique que dans les autres domaines, l'efficacité énergétique est supérieure du même pourcentage à celle du Québec. L'étude détaillée des bilans d'émission (table 2) montre que les gains de la Norvège se font principalement dans les domaines des transports (1,1 g éq. CO<sub>2</sub> pc de moins) et de la consommation résidentielle et commerciale (1,28 g éq. CO<sub>2</sub> pc de moins). Ce pourcentage dépasse largement l'objectif fixé dans le Protocole de Kyoto.

Un plan d'action de réduction de GES du Québec doit s'inscrire dans un plan plus général au niveau du Canada entier. D'un point de vue pragmatique et de l'équité, il semble raisonnable pour le Canada de répartir l'effort de réduction selon les possibilités économiques, géographiques et structurelles de chaque province, et non selon un taux de réduction d'émissions uniforme.

Dans la mise en oeuvre des politiques de réductions de GES au niveau national, il est important de veiller à ce que les mesures proposées ne favorisent ou défavorisent pas certaines provinces ou secteurs d'activités plus que d'autres. Ici, le principe d'équimarginalité doit prévaloir, c'est à dire que les objectifs de réductions doivent être répartis équitablement entre les secteurs et les provinces selon leurs potentiels de réduction, l'objectif final étant d'atteindre l'objectif de Kyoto au moindre coût possible et en répartissant ce coût équitablement parmi tous les

Canadiens. Une répartition de l'effort de réduction d'émissions au moindre coût pour le Canada peut engendrer des objectifs différents pour les provinces ou les secteurs et des paiements de transferts pourraient être appliqués pour rétablir l'égalité des coûts. La répartition équitable de réductions d'émissions et des coûts reste une question complexe et différentes approches sont préconisées, tant au niveau mondial dans le cadre du Protocole de Kyoto qu'au sein de l'Union européenne qui a réparti ses obligations de manière différenciée entre les pays-membres. Évidemment, le Québec a le droit de faire valoir le fait que ses émissions ont augmenté plus faiblement que celles d'autres provinces depuis 1990, que ce soit délibéré ou circonstanciel. En effet, le fait d'avoir moins augmenté ses émissions rend une réduction plus difficile par rapport à d'autres provinces ayant fait preuve de moins de modération.

Le Québec peut aussi faire valoir le fait que ses émissions ne sont pas uniquement moindres dans des domaines relevant des ressources naturelles (présence d'un potentiel hydroélectrique, absence de gisements de combustibles fossiles) mais aussi dans les domaines influencés principalement par les habitudes de consommation et les décisions politiques, comme le transport, où il est le plus faible émetteur de GES parmi les provinces canadiennes. Il serait donc légitime de demander aux autres provinces d'atteindre le niveau d'efficacité du Québec dans ces secteurs comparables avant de demander des réductions supplémentaires. Or, la situation politique et particulièrement le fait que le gouvernement fédéral soit porté à faire plus de concessions aux provinces qui s'opposent à la ratification du Protocole de Kyoto, en première ligne l'Alberta, qu'au Québec, qui a depuis le début fait preuve de leadership – du moins au niveau politique – dans ce dossier, peut mettre en péril l'équité dans la répartition de l'effort de réduction de GES. Par exemple, Jean Nolet de la Direction des changements climatiques au ministère de l'Environnement du Québec, relate en entrevue avec

le journaliste L.-G. Francoeur (2002b) un projet de plan fédéral consistant à calculer les réductions d'émissions nécessaires pour atteindre l'objectif de Kyoto à partir des émissions projetées en 2010 (et non des émissions actuelles ou du niveau de 1990). Cette approche favorisant ainsi les secteurs de production d'électricité thermique et d'extraction de combustibles fossiles dont les taux de croissance projetés sont nettement plus élevés (47% et 131%) que ceux du secteur manufacturier (3%). Ce plan est une concrétisation des concessions que le gouvernement canadien estime nécessaire de faire aux provinces de l'Ouest, afin de les rallier à la cause du Protocole de Kyoto, puisque les secteurs d'extraction de combustibles fossiles et de production d'électricité thermique leur sont propres alors que le secteur manufacturier est concentré principalement en Ontario et au Québec.

Le Québec se trouverait ainsi doublement pénalisé, premièrement en ayant à porter une partie plus importante de l'effort de réduction de GES que les autres provinces et deuxièmement en ayant à le faire à partir d'émissions déjà de moitié inférieures à la moyenne canadienne. Il sera donc important pour le Québec, au moment de se doter d'une politique de réduction de GES efficace, d'infléchir la politique fédérale en un sens qui respecte ses acquis et l'équité inter-provinciale.

Finalement, il est de notre avis qu'une politique de réduction de GES doit comprendre des incitatifs économiques. L'exemple de l'Europe et l'étude de la relation historique entre les prix du pétrole et les émissions de GES du Québec montrent l'efficacité de tels incitatifs. Ces incitatifs ne devraient pas se limiter à une simple taxation des GES, mais doit aussi comprendre des mesures favorisant les procédés énergiquement efficaces et la recherche en efficacité énergétique, un plus fort investissement dans les transports publics ainsi que des règlements accompagnés de subventions aux économies d'énergie (par exemple l'isolation des bâtiments). Les revenus d'une taxe sur le carbone devraient être réinvestis dans ces domaines et pourraient même servir à réduire les impôts sur le revenu, favorisant ainsi les secteurs plus intensifs en ressources humaines qu'en utilisation de combustibles fossiles.

### Glossaire des termes et unités employés

CAD : Dollars canadiens.

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC, HFC, SF<sub>6</sub> : le dioxyde de carbone, le méthane, le dioxyde d'azote, les chlorofluorocarbones, les hexafluorocarbones et l'hexafluorure de soufre sont les six types de gaz à effet de serre reconnus et comptabilisés.

Fe, Al, Mg : fer, aluminium, Magnésium. Principaux métaux primaires produits au Canada.

GES : gaz à effet de serre

gCO<sub>2</sub>, tCO<sub>2</sub> : grammes ou tonnes de CO<sub>2</sub>. Mesure d'émissions de GES qui n'inclut que le CO<sub>2</sub>

g éq. CO<sub>2</sub>, t éq. CO<sub>2</sub> : grammes ou tonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub>. Mesure d'émission de GES qui inclut les six GES en

tenant compte de leur pouvoir radiatif, par exemple, le CH<sub>4</sub> est multiplié par 24.

GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (aussi connu sous IPCC, Intergovernmental panel on climate change)

MEF : Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. Ce ministère a été scindé en deux parties, le Ede l'environnement du Québec et la Société de la Faune et des Parcs du Québec

MRN : Ministère des Ressources naturelles du Québec

OCDE : Organisation pour le commerce et le développement en Europe.

pc : per capita = par personne

PIB : produit intérieur brut.

préfixes k (10<sup>3</sup>), M (10<sup>6</sup>), G(10<sup>9</sup>), T(10<sup>12</sup>)

tep : tonnes d'équivalents de pétrole. Mesure d'énergie. 1 tep = X J

USD : Dollars américains.

W (kW, MW) : Watt. Mesure de puissance installée.

Wh (kWh, MWh, TWh) : Watt-heure. Mesure d'énergie, est égal à une puissance d'un watt produite ou consommée pendant une heure. 1Wh = x J

### Bibliographie

- Association de l'Aluminium du Canada (AAC) 2002. *Entente cadre de réductions volontaires des gaz à effet de serre au Québec conclue entre le gouvernement du Québec et l'Association de l'Aluminium du Canada*; Une entente volontaire avec le gouvernement du Québec : une première du genre en Amérique du Nord, <http://aac.aluminium.qc.ca/>
- Bergeron, A. 1999. *La réduction des gaz à effet de serre: Des engagements concrets*. Les Actualités, Noranda Magnesium, 23 janvier 1999.
- Brännlund, R. et Kriström, B 1997. *Energy and environmental taxation in Sweden*. Invited paper, Environmental Implications of Market Based Policy Instruments, Gothenburg, November 20-21, 1997.
- Chamberland, A., C. Bélanger et L. Gagnon 1996, *Atmospheric emissions : Hydro-electricity versus other options*, *Ecodecision*, **Winter 1996**, 56-60.
- Duchemin, É., M. Lucotte, V. St-Louis et R. Canuel 2002. *Hydroelectric reservoirs as an anthropogenic source of greenhouse gases*. *World Resource Review* **14**, 334-353.
- Duchemin, 2001, Hydroélectricité et gaz à effet de serre, *La revue en sciences de l'environnement VertigO*, Vol 2 No 1, p. 19-24, <http://www.vertigo.uqam.ca/vol2no1/pdf/vertigovol2no1.pdf>
- Francoeur, L-G. 2002a. *Presque aussi propre que l'Europe*, *Le Devoir* 19&20 octobre 2002.
- Francoeur, L-G. 2002b. *Un plan contaminé?*, *Le Devoir* 26&27 octobre 2002.
- Gagnon, L. et L. Varfalvy 2000. *GHG Emissions from Boreal Reservoirs*, Hydro-Québec, direction – Environnement.
- Gagnon, L. et J. F. van de Vate 1997. *Greenhouse gas emissions from hydropower*, *Energy Policy* **25/1**, 7-13.
- Government of Japan, The 2002. *Japan's third national communication under the United Nation's Framework Convention on Climate Change*.
- Hennicke, P. et S. Ramesohl 1998. *Interdisciplinary analysis of successful implementation of energy efficiency in the industrial, commercial and service sector, final report, , volume II, chapter 1 : The danish CO2 tax on trade and industry*, Energieverwertungsagentur e.V., Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Institute for Psychology, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Institute of Local Government Studies, Wuppertal Institute for Climate Environment Energy, Copenhagen, Karlsruhe, Vienna Wuppertal, February 1998.
- Institut de statistique du Québec 2002. <http://www.stat.gouv.qc.ca/>

- International Aluminium Institute (IAI) 2001. *Perfluorocarbon emissions reduction programme 1990-2000*, IAI, London, UK. (disponible [www.world-aluminium.org](http://www.world-aluminium.org))
- Inventaire canadien 2002. *Inventaire Canadien des gaz à effet de serre 1990-2000*, Division des gaz à effet de serre, Environnement Canada
- Inventaire norvégien 2000. *The Norwegian Emission Inventory*, Statistics Norway, Oslo-Kongsvinger.
- Inventaire québécois 2002. *Inventaire québécois des gaz à effet de serre 1990-2000*, Ministère de l'Environnement du Québec, Bibliothèque nationale du Québec.
- IPCC/GIEC 1995. *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and mitigation of climate Change: Scientific-technical analyses*, p. 603, IPCC, Genève.
- Jahresbericht der Bundesregierung 1999 an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. *Treibhausgasinventare für die Bundesrepublik Deutschland für die Jahre 1990 bis 1998*.
- Mäenpää, I. 1998. *The economy, energy and air emissions*. Statistics Finland, Helsinki.
- MEF et MRN 1998. *Communiqués de presse : le ministère de l'Environnement et de la Faune et le ministère des Ressources naturelles se réjouissent de l'adhésion de Norsk Hydro au programme ÉcoGESté*, Québec, le 23 novembre 1998.
- Ministère de l'Environnement du Québec 2003. <http://www.menv.gouv.qc.ca/air/changement/ecogeste.htm>
- Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) 2001. *L'énergie au Québec*, édition 2001, Les publications du Québec, Sainte Foy.
- Norwegian Petroleum Directorate 2002. Calculation of CO<sub>2</sub> tax on the Norwegian shelf, [www.npd.no](http://www.npd.no)
- Norwegian Public Roads Administration, The 2004. [www.aksess.no/vegvesenet/concert](http://www.aksess.no/vegvesenet/concert)
- OCDE 2002. Energy indicators 1999, [www.ocde.org](http://www.ocde.org).
- Pershing, J. 2000. *Common approaches: Taxes, trading and negotiated agreements*, Pew Center conference on innovative policy solutions to global climate change, Washington, D.C., April 2000.
- St. Louis, V. L., C. A. Kelly, É. Duchemin, J. W. Rudd et D. M. Rosenberg 2000. *Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere : a global estimate*. *BioScience* **50**, 766-775.
- Statistics Finland 2002. Monthly indicators of GDP 2002, April.
- Steen, P. H. 1999. *Green tax package in Denmark and introduction of a CO<sub>2</sub> quota system in Denmark*, IEA Workshop ([www.iea.org/workshop/steen1.pdf](http://www.iea.org/workshop/steen1.pdf)).
- Turton, H. et C. Hamilton 2002. *Updating per capita emissions for the industrialized countries*, The Australia Institute, Australian National University, Canberra. (disponible <http://www.tai.org.au/>)
- UNEP 2002. Thematic portals : Climate change, [www.grida.unep.net](http://www.grida.unep.net).
- Weissenberger, S., É. Duchemin, S. Houel, R. Canuel et M. Lucotte "Greenhouse gas emissions and carbon cycle in boreal reservoirs". *Proceedings of the International Conference on Greenhouse Gas Emissions from Dams and Lakes*, Rio de Janeiro, December 1998.

# DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES SPATIALES DE CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL ÉOLIEN OFFSHORE ET CÔTIER PAR IMAGERIE RADARSAT : cas du golfe du St-Laurent

Par Julien Choisnard<sup>1</sup>, Gaétan Lafrance<sup>1</sup> et Monique Bernier<sup>2</sup>, <sup>1</sup>INRS-EMT, Université du Québec, 1650, boulevard Lionel-Boulet, Varennes, Québec, J3X 1S2, Tél. (450) 929-8252 et 8151, Fax (450) 929-8102, Courriel : [choisnard@inrs-emt.quebec.ca](mailto:choisnard@inrs-emt.quebec.ca) [lafrgaet@inrs-emt.quebec.ca](mailto:lafrgaet@inrs-emt.quebec.ca), <sup>2</sup>INRS-ETE, Université du Québec, 2800, Rue Einstein, bureau 020, Case postale 7500, Sainte-Foy, G1V 4C7, Tél. (418) 654-2585, Courriel : [Monique\\_Bernier@inrs-ete.quebec.ca](mailto:Monique_Bernier@inrs-ete.quebec.ca)

---

**Résumé** : Les techniques spatiales et plus particulièrement les images des Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) de RADARSAT-1 pour les régions côtières offrent une information de qualité là où les mesures terrestres sont trop rares et les modèles météorologiques limités. Dans cet article nous présentons une méthodologie utilisant des images RSO avec des données du diffusiomètre QuickSCAT et des mesures locales pour obtenir des images du vent de la surface maritime du golfe du St-Laurent. Les cartes du vent obtenues pour 10 images RADARSAT-1 sont à une haute résolution spatiale (400 m), sur des grandes régions (300 km) et avec une précision évaluée à 1.5 m/s. Les principaux avantages de cette technique, l'observation de la variabilité spatiale du vent et de l'influence de la topographie environnante, sont mis en évidence sur deux exemples.

**Mots clefs** : ressource éolienne, télédétection, RADARSAT-1, variabilité spatiale du vent, vitesse du vent offshore, région côtière

**Abstract** : This paper documents the usefulness of offshore and coastal wind maps from satellite techniques. As a step before metering programs, remote sensing approaches are gaining much interest, especially for offshore analysis. As an intermediate approach, it gives first estimates of the best wind sites. In the complex coastal area of St-Lawrence gulf, strong effects of local topography characterize wind fields and the wind resource assessment is challenging. Wind fields are extracted from Synthetic Aperture Radar (SAR) scenes provided by the RADARSAT-1 satellite and from QuickSCAT scatterometer collocated wind direction. The spatial resolution of such a technique is around 400 m covering wide region until 300 by 300 km. Among interesting findings, it appears that a relative small sample of scenes can already indicate the best spots to investigate for further analysis. Accuracy of the method is evaluated at 1.5 m/s offshore and around 2 m/s close to the shore.

**Key words** : wind resource, remote sensing, RADARSAT-1, spatial wind variability, offshore, coastal

---

## Introduction

La mesure du vent au-dessus des océans a connu une révolution avec le développement des techniques spatiales. Or, ces mesures sont capitales pour comprendre la dynamique de la circulation de l'océan, véritable moteur du climat terrestre et lieu d'importantes interactions à l'interface océan-atmosphère. Avant l'utilisation de la télédétection, la plupart des mesures du vent océaniques étaient effectuées à bord des bateaux marchands.

La distribution et la qualité des mesures du vent à partir des navires sont limitées. Mis à part pour les navires affrétés pour des programmes de recherche, les mesures à bord des navires sont difficiles à exploiter scientifiquement (Smith et al., 1999). Plusieurs types de modèle météorologique ont été développés pour décrire le champ du vent sur une région spécifique en

l'absence de données locales. La dimension de la surface de référence considérée (quelques kilomètres à plusieurs milliers de kilomètres) définit l'échelle des phénomènes physiques pris en considération et la résolution spatiale. Par exemple, les modèles météorologiques de prévision climatique à l'échelle régionale, comme ceux à la taille du Canada, permettent d'obtenir une information sur le vent à une résolution de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Les modèles micro-échelles, spécifiques aux analyses locales, permettent l'évaluation du gisement éolien à quelques dizaines de mètres. Cependant, quelle que soit leur résolution, ces modèles sont limités d'une part par notre compréhension et la résolution mathématique des phénomènes physiques et d'autre part par la disponibilité des données nécessaires à leur bon fonctionnement. En particulier en ce qui concerne la surface océanique où la dynamique atmosphérique est complexe. Ainsi, il a été porté un soin particulier aux



missions satellites afin de combler l'absence de mesure fiable, précise et systématique du vent océanique.

Les diffusiomètres, capteurs actifs disposants de leur propre source de rayonnement, dans le domaine des hyperfréquences, permettent d'obtenir une mesure de la vitesse et direction du vent de la surface des océans quelles que soient les conditions de couverture nuageuse, de jour comme de nuit. Les dernières décennies ont permis d'améliorer sans cesse la couverture et la résolution spatiale de ces mesures.

Toutes les techniques de mesure du vent à la surface océanique dans le domaine des hyperfréquences utilisent le même phénomène : la création des vaguelettes et la modification de l'état de la mer par le travail du vent à sa surface. Ainsi, les capteurs passifs, type radiomètre (SSM/I) mesurent la température de brillance influencée par la mousse et la structure des vagues à une résolution spatiale de 15 à 55 km. Les capteurs actifs, type diffusiomètre (SeaSAT, ERS-1/2, QuickSCAT, SeaWinds) mesurent la rétrodiffusion radar des vagues sur des cellules de résolution d'environ 25 km de dimension depuis près de 30 ans. Les antennes multiples dont sont équipés les diffusiomètres permettent plusieurs mesures indépendantes de la rétrodiffusion. L'estimation des deux paramètres vitesse et direction du vent est ainsi rendue possible.

Dans les années 1970, la plate-forme spatiale SeaSAT, malgré la brièveté de sa mission, démontra la capacité des systèmes Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) à observer le vent océanique à très haute résolution (de l'ordre de la centaine de mètres). Basé sur le même principe que les diffusiomètres, les RSO permettent d'obtenir non pas une information ponctuelle sur la surface océanique sur une grille fixe de 25 km, mais une image instantanée de la structure océanique. Par exemple, pour le RSO de SeaSAT, des images de 40 km de côté à une résolution de 25 m ont été obtenues. Cependant, pour les RSO, il n'est pas possible d'estimer directement à la fois l'intensité et la direction du vent. L'un ou l'autre doit être évalué préalablement. Cet inconvénient est levé en utilisant des données auxiliaires sur la direction du vent ou en évaluant la direction via les structures apparaissant sur la surface de l'eau. Cet aspect est explicité plus en détails dans la partie sur l'état de l'art de la mesure du vent sur les images RSO. Contrairement aux diffusiomètres embarqués sur des satellites qui fournissent une information journalière quasi-synoptique, les RSO offrent des images instantanées locales à haute résolution. Ainsi, le principal avantage des techniques d'imagerie RSO vis à vis des diffusiomètres est la possibilité d'observation des fines variations spatiales sur des zones aussi complexes que les régions côtières.

Les premières applications se développèrent avec les missions SIR-A en 1981 et SIR-B en 1984 embarquée sur la navette spatiale américaine. En 1991, l'Agence Spatiale Européenne lance ERS-1, premier satellite radar d'observation de la Terre. Dorénavant, la meilleure compréhension des phénomènes à l'interface air-océan et la maîtrise accrue de l'étalonnage des

images RSO permettent d'utiliser les méthodes développées pour les diffusiomètres à une haute résolution. Ensuite, quatre satellites radar ont été lancés : JERS-1 en 1992 (Japon), ERS-2 (Europe) et RADARSAT-1 (Canada) en 1995, ENVISAT en 2002 (Europe). Ces trois derniers sont encore opérationnels et le lancement de RADARSAT-2 (Canada) est prévu pour 2004-2005.

Rapidement, en parallèle au développement des systèmes RSO, des nouvelles applications ont vu le jour. En particulier, l'émergence continue de l'industrie éolienne depuis 10 ans et son important besoin de mesure du vent offshore offre une opportunité spécifique pour les RSO depuis les observations de Johannessen, Espedal et al. (1999).

### **Énergie éolienne au Québec et au Canada**

Bien que le Canada demeure encore un petit joueur sur l'échiquier mondial de l'énergie éolienne, l'objectif de l'industrie est ambitieux : l'association canadienne de l'énergie éolienne a fixé un objectif de 10,000 MW pour l'horizon 2010. C'est beaucoup quand on pense qu'en 2002 la capacité installée au Canada était seulement de l'ordre de 214 MW. Le Québec, avec 100 MW de puissance installée, se démarque par sa capacité à intégrer de grands parcs d'éoliennes dans son réseau hydroélectrique (Lafrance et Bertho, 1998) et a entrepris de mieux caractériser ses ressources éoliennes afin de profiter pleinement des meilleurs sites. Pour plus d'informations sur ce programme, se référer au site Internet :

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/energie/energie/20024009.pdf>

La région du golfe St-Laurent fait partie des meilleurs sites de vent au Canada. Il est utile de souligner que cette région du pays représente une force dans le domaine éolien au Canada. En plus d'offrir de bonnes conditions d'implantation, la région du Québec/Labrador offre la possibilité d'exploiter un stockage d'envergure pour la production électrique d'origine éolienne : la gestion de ses réservoirs hydroélectriques. Cette région représente 70% des réservoirs gérables sur une base multi-annuelle au Canada. Dans ce contexte, le couplage hydro-éolien au Québec est un atout important pour le développement de la filière éolienne (Lafrance, 2000).

La connaissance des ressources éoliennes est capitale pour l'industrie éolienne. Elle peut s'appréhender sous plusieurs approches, allant de la macro-échelle à la micro-échelle. Sur de vaste territoire, l'utilisation des modèles météorologiques de prévision peuvent permettre de défricher le terrain, même s'il faut bien faire attention à l'interprétation des simulations sur les régions accidentées. Au niveau micro-échelle, les mesures directes du vent par anémomètre sont évidemment précises et fiables pour les endroits où des tours de mesure sont installées. Depuis plus de 50 ans, les services d'Environnement Canada (EC) gèrent un parc important de mâts de mesure. Ces mesures

de vent ont souvent été entreprises au niveau des aérodromes pour assurer la sécurité aérienne. Plus récemment, le Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNQ) a mis en place un programme important de mesure des vents, principalement en Gaspésie, à des fins de cartographie du potentiel éolien. Ce type de mesure est onéreux et l'aspect souvent aléatoire des points de mesure couplé à l'absence de corrélation entre les différents mâts de mesure, ne permet pas une cartographie fiable à grande échelle.

Entre les modèles très globaux et les méthodes de mesurages, il existe donc une plage de possibilités pour des méthodes qui donnent des estimations de la vitesse des vents à un coût raisonnable. Il est clair que l'analyse des vents à un niveau micro passe par un système de mesure. Mais l'objectif de ces méthodes intermédiaires est de réduire le nombre de tours à installer.

### Cas de l'éolien offshore

Le contexte actuel de l'industrie éolienne semble privilégier le développement des exploitations offshore. Même si cette technique est encore nouvelle (les premiers parcs en mer datent de 2000), elle semble très prometteuse, d'une part parce que la ressource éolienne offshore est très attractive (vent plus élevé, turbulence plus faible et contrainte territoriale faible) et d'autre part parce que les zones terrestres intéressantes se raréfient dans les pays d'Europe du Nord. Les coûts d'installation supérieurs liés aux fondations maritimes et au câblage sont amortis grâce à des vitesses de vent supérieures et une turbulence plus faible. Côté faisabilité, l'installation d'éolienne offshore est considérée pour des eaux de profondeur inférieures à 30 mètres. Cependant cette valeur peut s'étendre jusqu'à 50 m et certaines études sur les éoliennes « flottantes » semblent prédire des possibilités supplémentaires si les conditions de vent sont bonnes (Henderson et al., 2002).

En général, l'écoulement du vent dans les régions côtières est hautement complexe et introduit de nombreuses incertitudes dans l'estimation de la ressource. Ainsi, sur une région comme la Gaspésie, les modèles micro-échelles peuvent être limités dans leur capacité à représenter l'ensemble des influences sur le champ de vent. D'où l'intérêt d'utiliser la télédétection comme technique d'évaluation du potentiel éolien pour la partie maritime. Le satellite canadien RADARSAT-1 offre la possibilité d'un grand choix de format d'images à une haute résolution spatiale et même si son application est limitée aux analyses en mer et en terme de résolution temporelle, il est intéressant d'étudier l'information que peut nous apporter cet outil dans un processus de cartographie du vent. Ce domaine de recherche fait l'objet d'un intérêt soutenu. L'Agence Spatiale Européenne a identifié le marché de l'énergie éolienne comme un utilisateur

potentiel de données satellites et a mis en œuvre un programme de recherche dans ce sens (Hasager, 2000).

### État de l'art sur la mesure du vent par images RSO

Afin d'estimer la vitesse du vent sur des images RSO, nous utilisons la mesure du coefficient de rétrodiffusion radar  $\sigma^0$  avec une information sur la direction du vent et sur la géométrie de la prise d'image RSO. Nous nous appuyons sur un modèle liant le coefficient de rétrodiffusion radar  $\sigma^0$ , la direction du vent et la géométrie du radar. Même si les modèles physiques se développent, il est pour le moment plus aisé d'utiliser des modèles semi-empiriques avec des informations in situ sur la direction du vent. La caractéristique commune des modèles empiriques du vent (en bande C comme pour les autres fréquences) est la description du coefficient de rétrodiffusion, pour une polarisation et une fréquence donnée, comme une fonction de  $\theta$ , l'angle d'incidence mesuré dans le plan vertical entre l'onde incidente et la normale à la surface,  $\varphi$ , l'angle d'azimut mesuré dans le plan horizontal entre la direction de visée du radar et celle du vecteur vent et  $U_{10}$ , la vitesse du vent à 10 mètres dans des conditions de stabilité neutre :

$$\sigma_0 = f(\theta, \varphi, U_{10})$$

Le modèle CMOD-IFR2, développé par l'IFREMER (Institut Français d'Étude de la Mer) au laboratoire d'Océanographie Spatiale est utilisé couramment pour fournir les produits de vent des diffusiomètres d'ERS-1/2 (polarisation verticale de l'onde émise et réceptionnée : VV) par l'IFREMER. Il a été validé pour un angle d'incidence entre 18 et 58 degrés et une gamme de vitesse du vent de 2 à 25 m/s (Quilfen et al., 1998). Pour la polarisation HH du RSO de RADARSAT-1, il n'existe pas de jeu de données suffisant pour développer des modèles empiriques. C'est pourquoi, on utilise un modèle hybride basé sur les modèles empiriques en bande C, polarisation VV et sur la théorie et les mesures de rapports de polarisation (RP). Il y a plusieurs choix possibles pour le rapport de polarisation, à la fois des équations théoriques, mais aussi des formulations empiriques. Le choix du RP, théoriquement unique, semble varier d'un jeu de données à l'autre (Vachon et Dobson, 2000; Monaldo et al., 2001). Une étude préliminaire sur le golfe du St-Laurent avec des images RADARSAT-1 traitées au CDPF (Canadian Data Processing Facility de Gatineau) confirme l'intérêt du rapport de polarisation de Kirchhoff (Choisnard et al., 2003). Le modèle CMOD-IFR2 appliqué sur les images RADARSAT-1 avec le RP adéquat est reconnu fiable pour la gamme de vitesse du vent de 2 à 25 m/s avec une précision autour de 2 m/s pour les conditions les moins favorables (Vachon et Dobson, 2000; Monaldo, Thompson et al., 2001; Kim et Moon, 2002).

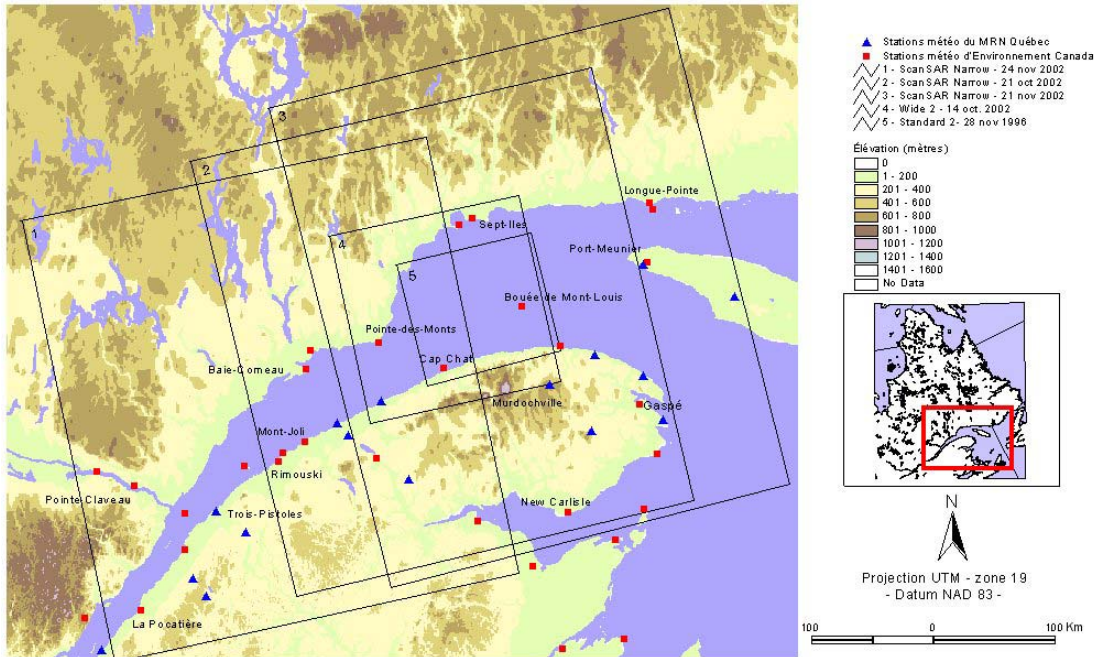


Figure 1. Topographie de la région. Localisation indicative des scènes RADARSAT-1 et des stations météorologiques d'EC et du MRNQ.

Étant donné que ce modèle nécessite la connaissance de la direction du vent, plusieurs techniques ont été développées pour extraire cette information sur les images RSO. Sous certaines conditions météorologiques, des structures atmosphériques à l'échelle kilométrique sont visibles sur les images RSO et sont grossièrement alignées avec la direction du vent (Gerling, 1986; Worthington, 2001). En présence de ces structures, la direction du vent peut alors être estimée soit dans le domaine spectral par transformée de Fourier 2-D (Vachon et Dobson, 1996), soit dans le domaine spatial, avec la transformée en ondelettes (Du et al., 2002) ou l'utilisation des gradients locaux perpendiculaires avec la direction du vent (Koch, 2000). Ainsi, Horstmann et al. (1999) ont observé que la présence de ces structures permettent d'extraire la direction du vent par transformée de Fourier 2-D dans 65 % des cas sur des images ERS. En l'absence d'information exploitable directement sur les images RSO, la direction du vent local peut être estimée à l'aide de données ponctuelles (mât de mesure ou bouée), de données satellites (diffusiomètre ou radiomètre) ou en utilisant les informations issues de modèles météorologiques (Monaldo, Thompson et al., 2001).

**Région d'intérêt : le golfe du St-Laurent**

Notre zone d'intérêt pour cette étude est localisée autour de l'élargissement du St-Laurent, situé à Pointe des Monts, et sur la région côtière de la Gaspésie en particulier. Il s'agit d'une zone reconnue pour son potentiel éolien et où se trouve le plus grand

parc éolien du Canada, Le Nordais de 100 MW de puissance installée à Cap-Chat et Matane. Cette région (figure 1) est caractérisée par un haut niveau de complexité due à l'influence conjointe d'une grande masse d'eau, le St-Laurent, et de zones montagneuses sur la chaîne des Appalaches avec les monts Chic-Chocs (culminant à 1268 m pour le mont Jacques-Cartier).

Dans le St-Laurent, de manière générale, plus le temps fraîchit plus le vent souffle fort. Le vent est régulier pendant l'été avec très peu de vent fort (moins de 30 % de vent supérieur à 13 nœuds soit 6.7 m/s), puis plus les journées raccourcissent, plus le vent prend de la vigueur au fur et à mesure du passage des dépressions du début de l'automne à l'hiver. Après la période hivernale, marquée par les vents les plus forts (plus de 50 % de vent supérieur à 13 nœuds), la force du vent décroît (O'Bomsawin et Poupart, 1992). De ce fait, le St-Laurent est sur la trajectoire hivernale des dépressions. À ces caractéristiques principales s'ajoutent des phénomènes locaux liés à l'orographie de la région : effet de canalisation, entonnoir, barrière... Il est à noter que cette région est prise dans les glaces typiquement de décembre à mars. Notre étude se limitera à la période hors-glace.

**Les données**

La première analyse des résultats sur les images obtenues via l'Agence Spatiale Canadienne a permis de mettre en évidence l'intérêt des images RADARSAT-1 à large couverture spatiale : faisceau Large (W1 et W2) et ScanSAR Narrow (SNA) avec mode automatique (AGC) du gain. Les conditions météorologiques au moment de l'acquisition des images ont été

vérifiées afin de se placer dans des conditions de vent stationnaire depuis plus de 4 heures et des vitesses supérieures à 3-4 m/s. Ces conditions doivent permettre une meilleure fiabilité de l'estimation du vent sur les images RSO.

Pour cette étude, en plus des informations fournies par EC aux emplacements des stations terrestres en bordure du St-Laurent et des mesures à la bouée de Mont-Louis, nous avons utilisé les données de mesurage du vent du MRN Québec. Au total, 52 stations ont été utilisées.

Les stations météorologiques d'EC fournissent une mesure horaire de la vitesse et direction du vent, température et pression à 10 m de hauteur. Pour les mâts du MRN Québec, nous avons la plupart du temps deux mesures, une à 20 m et une autre à 40 m toutes les 10 minutes, de la vitesse, direction et écart-type de chaque mesure ainsi que la température. La bouée de Mont-Louis permet d'obtenir la vitesse et la direction du vent à deux hauteurs (10 et 16 pieds, soit respectivement 3.05 et 4.88 mètres) et ainsi d'évaluer le profil vertical du vent au moment de l'acquisition des images RADARSAT-1. De façon générale, on sait que les mesures du vent à l'aide de bouées connaissent une surestimation des vents faibles et forts. De plus, en cas de forte houle, avec des hauteurs de vagues importantes, la mesure des vents peut être perturbée. Dans le cas des stations terrestres, même en région côtière, quelle que soit la topographie environnante, l'observation

du vent est influencée par le changement de rugosité terre/mer et la vitesse du vent est légèrement différente de celle au-dessus de l'eau.

Les conditions météorologiques considérées au moment de chaque acquisition d'image RADARSAT-1 sont celles mesurées à la bouée de Mont-Louis (voir tableau 1). Afin d'extrapoler la vitesse du vent mesurée à la bouée (4.88 m) à la hauteur de 10 m nous avons utilisé un code suivant la méthodologie de Smith (1988) en utilisant la température de l'air. Chaque condition atmosphérique a été classée en terme de stabilité atmosphérique, de direction du vent selon 16 secteurs et en terme d'intensité du vent. La stabilité atmosphérique est évaluée après l'estimation de la longueur de Monin-Obukhov L. Ce paramètre est calculé en utilisant le code TOGA COARE (version 2.0) de Fairall et al. (1996).

La série d'images RSO de RADARSAT-1 utilisée correspond donc aux conditions suivantes :

- Intensité du vent : léger (< 6 m/s), brise (6-10 m/s) et fort (> 10 m/s);
- Direction du vent : du golfe (90-150°), du fleuve (270°) et du nord (320-360°);
- Stabilité atmosphérique : stable, neutre et instable.

Images RADARSAT-1			INFORMATION METEOROLOGIQUE				
Date	Faisceau	Gain	U_10	Dir.	Stabilité	Origine	Force
28-nov-96	S2	AGC	5.56*	280*	instable	W	léger
06-juin-02	W1	AGC	6.83	275‡	stable	W	brise
16-juin-02	W2	AGC	8.13	92	instable	E	brise
21-oct-02	SNA	fixe	12.83	271	neutre	W	fort
28-oct-02	SNA	fixe	11.4	335	neutre	NNW	fort
21-nov-02	SNA	AGC	6.94	127	neutre	SE	brise
07-oct-02	SNA	AGC	6.18	172	stable	SE	brise
14-oct-02	W2	fixe	15.92	301	neutre	WNW	fort
07-nov-02	W2	fixe	14.26	322	instable	NW	fort
24-nov-02	SNA	AGC	13.38	331	neutre	NNW	fort

Tableau 1. Conditions atmosphériques et océaniques au moment de l'acquisition des images RADARSAT-1 selon les informations à la bouée de Mont-Louis à 22:20.

Note : U\_10 = vitesse du vent extrapolée à 10 m; Dir = direction du vent mesurée à 16 pieds selon la convention météorologique; Force = dénomination maritime du vent suivant sa vitesse. \* : mesure à la stations de Cap Chat à 10 m; † moyenne climatique; ‡ moyenne des données de 21:20 et 23:20.

Les données du vent océanique du diffusiomètre QuickSCAT sont obtenues en ligne, via le Jet Propulsion Laboratory de la NASA, sur une grille de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (Perry, 2001). Le diffusiomètre QuickSCAT fait parti du programme SeaWind d'observation spatiale des vents océaniques et a quasiment les mêmes caractéristiques orbitales que RADARSAT-1 et est donc très bien co-localisé pour notre étude. La résolution spatiale du diffusiomètre QuickSCAT permet d'obtenir un nombre important de mesures co-localisées avec les images RADARSAT-1 de type Large ou ScanSAR. La précision requise par QuickSCAT est de  $\pm 2$  m/s pour la vitesse et  $\pm 20^\circ$  pour la direction pour la gamme de vitesse de vent 3-20 m/s. En région côtière, les données disponibles sont à plus de 25 km de la côte et la précision des données a rarement été évaluée. Sanchez et al. (2003) ont réalisé une comparaison de données QuickSCAT avec des mesures sur les côtes du Portugal. Cette étude montre qu'en moyenne les spécifications de QuickSCAT sont atteintes malgré un biais de 10 à  $20^\circ$  (également observé lors de comparaison avec des bouées) et des influences côtières présumées.

Pour notre étude, les données du diffusiomètre QuickSCAT vont permettre d'estimer la direction du vent au moment de l'acquisition de l'image RADARSAT-1 et fournir une base de données de comparaison de la vitesse du vent offshore (à plus de 25 km des côtes) sur les images RSO.

### **Méthodologie**

La méthodologie d'estimation de la vitesse du vent à haute résolution sur les images RSO de RADARSAT-1 nécessite plusieurs étapes.

#### **Étalonnage et traitement de l'image RADARSAT-1**

L'extraction du coefficient de rétrodiffusion radar est effectuée en utilisant les données RADARSAT-1 au format CEOS (Committee on Earth Observation Satellites). Ce format est standard pour les données satellites. Les spécifications décrites dans le document fourni par l'ASC (Shepherd, 2000) permettent d'évaluer les paramètres géométriques et radiométriques de chaque image. Ceci est réalisé à l'aide de programmes de traitement des données RADARSAT-1 développés au Centre Canadien de Télédétection (Vachon et Dobson 2000). Nous les avons modifiés pour obtenir des images de rétrodiffusion radar en décibels à la résolution de 400 mètres.

Avant d'utiliser l'image RADARSAT-1 pour extraire la vitesse du vent, nous créons un masque sur les parties terrestres afin d'une part de ne pas appliquer le modèle radar-vent sur des pixels terrestres et d'autre part pour ensuite extraire les valeurs de vitesse les plus proches des stations météorologiques côtières. A cette étape, nous disposons des données de l'intensité radar en décibel, de l'angle d'incidence et de la direction de visée du radar

pour chaque pixel de 400 mètres sur la partie maritime des images du golfe du St-Laurent.

#### *Estimation de la direction du vent*

Dans les étapes d'estimation de la vitesse du vent à partir d'images RSO, il faut apporter un soin particulier à la connaissance de la direction du vent. La connaissance a priori de la direction du vent est indispensable pour utiliser le modèle CMOD-IFR2 et est la principale source d'erreur (Horstmann et al., 2000; Choïnard et al., 2003). Pour extraire la direction du vent nous avons choisi de construire un champ de direction du vent interpolé à partir de plusieurs mesures locales et des données du diffusiomètre QuickSCAT. La technique retenue est basée sur le principe d'interpolation bi-harmonique spline et implémentée sous Matlab (Sandwell, 1987). L'information sur la direction du vent est extraite à l'emplacement de chaque pixel de 400 mètres des images RADARSAT-1.

#### **Extraction de la vitesse du vent par le modèle hybride**

La connaissance à chaque pixel des images RADARSAT-1 de l'intensité radar, de la direction du vent, de l'angle d'incidence et de la direction de visée du radar permet d'appliquer le modèle hybride (CMOD-IFR2 et rapport de polarisation de Kirchhoff) présenté précédemment. Une fois les images du vent obtenues pour toutes les images RSO à la résolution spatiale de 400 mètres, la précision du modèle sur notre zone d'étude peut être évaluée en comparant avec les mesures in situ.

#### **Données auxiliaires de validation**

Pour chaque image RADARSAT-1, nous comparons la vitesse du vent obtenue (à 10 m au-dessus du niveau de la mer pour des conditions de stabilité neutre) avec les trois sources d'information disponibles :

- les données à la bouée de Mont-Louis moyennées sur 25 pixels ( $2 \times 2$  km);
- les données en bordure de la ligne de côte aux emplacements des stations météorologiques côtières EC. A partir des coordonnées spatiales des stations, nous utilisons une fenêtre carrée de taille croissante jusqu'à ce qu'au moins une valeur de cette fenêtre appartienne à la partie maritime de l'image;
- les données QuickSCAT sur  $25 \times 25$  km (résolution spatiale du diffusiomètre).

Il existe une différence intrinsèque entre la mesure du vent à une station météorologique (moyenne temporelle ponctuelle) et la vitesse du vent sur les images RSO (moyenne spatiale quasi-instantanée). Cependant, l'hypothèse de Taylor de « turbulence gelée » (frozen turbulence) permet de décrire des phénomènes atmosphériques à l'échelle spatiale avec une observation météorologique ponctuelle.

La phase de validation de la vitesse du vent de surface estimée d'après les images RSO nécessite la connaissance des caractéristiques des valeurs in situ servant de référence. Les spécifications de la bouée Mont-Louis sont +/- 1 m/s (ou 10 %), celles des stations terrestres d'Environnement Canada +/- 0.3 m/s et celles des mesures QuickSCAT +/- 2 m/s. Outre la précision de ces mesures, la comparaison des valeurs de vitesse de vent sur les images RSO introduit une légère incertitude supplémentaire sur la localisation spatiale des stations et de la bouée (erreur de localisation spatiale). En effet, les coordonnées géographiques des stations météorologiques d'EC sont fournies à la minute près. Ceci signifie que la précision de la localisation de chaque mât est de l'ordre du kilomètre. Des démarches ont été entreprises auprès d'EC pour obtenir une information plus fiable. Dans le cas des stations du MRN Québec, la précision de la localisation est supposée meilleure (à la seconde, soit quelques dizaine de mètres), mais des doutes subsistent quant à l'exactitude de l'information suite à une analyse préalable.

**Résultats et discussion**

**Comparaisons des vitesses RSO avec les données co-localisées**

L'évaluation de la précision de l'estimation du vent sur les images RADARSAT-1 du golfe du St-Laurent est effectuée sur

trois types de données. Au niveau de la bouée de Mont-Louis, nous disposons de sept images RSO. Pour les données du diffusiomètre QuickSCAT, un ensemble de 70 données co-localisées avec sept images RADARSAT-1 est disponible. Pour les stations côtières, sélectionnées à moins de 2 km de la côte, nous avons un jeu de 52 données sur les dix images. Au-delà de la distance de 2 km, l'erreur sur l'estimation de la vitesse du vent vis-à-vis des mesures aux stations côtières augmente fortement.

Le tableau 2 présente les caractéristiques statistiques de chaque base de données et la comparaison avec la vitesse sur les images RSO. Dans le cas des stations côtières, on observe un biais négatif (-0.33 m/s) et une erreur de 2.5 m/s. Dans les deux autres cas (bouée et QuickSCAT), correspondant à des comparaisons plus directes de vitesses au-dessus de la surface de l'eau, on a un biais positif (vitesse sur les images RSO supérieure aux mesures), une erreur entre 1.5 et 2.2 m/s et une corrélation de 0.91 à 0.97.

Les tendances en fonction du type de données considérées avec la meilleure régression linéaire correspondante sont représentées sur la figure 2.

	Données in situ			RADARSAT-1		U10 RSO - U10 in situ		
Type de données	Nb	U <sub>min</sub> -U <sub>max</sub>	Ū10 (σ)	U <sub>min</sub> -U <sub>max</sub>	Ū10 (σ)	biais	RMSE	Corrélation
bouée Mont-Louis	7	6.9 - 15.9	10.9 (3.6)	7.3 - 18.9	12.7 (4.5)	1.84	2.16	0.97
stations côtières	52	2.5 - 15.8	8.3 (3.2)	3.2 - 13.8	7.9 (3.0)	-0.33	2.52	0.67
QuickSCAT	70	4.6 - 16.9	9.9 (3.1)	3.2 - 17.2	10.1 (3.6)	0.21	1.55	0.91
Toutes	129	2.5 - 16.9	9.2 (3.3)	3.2 - 18.9	9.4 (3.6)	0.08	2.03	0.83

Tableau 2. Comparaison des vitesses de vent sur les images RSO vis à vis des mesures à la bouée de Mont-Louis, aux stations côtières et des données QuickSCAT.

Note : Ū10 = vitesse moyenne (en m/s); σ = écart type de la vitesse (en m/s)

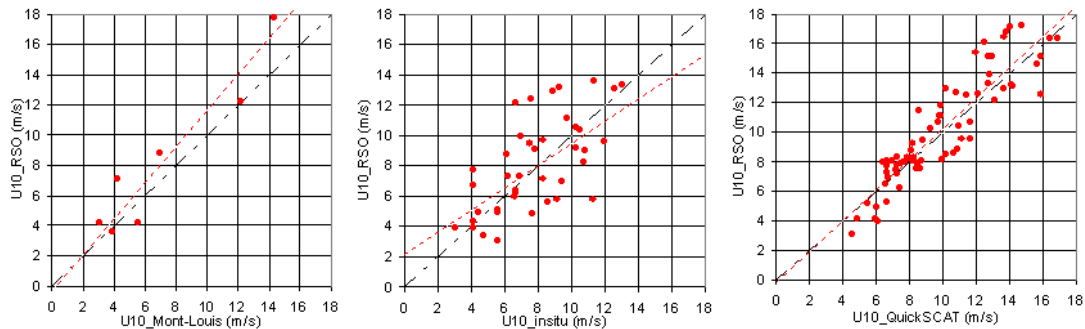


Figure 2. Comparaisons des vitesses de vent sur les images RSO avec les valeurs in situ : a) à la bouée de Mont-Louis (sur une surface de 2x2 km); b) aux stations côtières et c) du diffusiomètre QuickSCAT (sur une surface de 25x25 km).

Sur un jeu de donnée réduit, on observe une nette surestimation de la vitesse du vent sur les images RSO par rapport aux mesures à la bouée. La taille de la surface choisie (2 par 2 km) pour extraire la vitesse peut influencer sa valeur de façon très légère. L'interpolation verticale du vent mesuré à l'anémomètre (4.88 m) à la hauteur de 10 m peut avoir une influence plus importante. De plus, la précision sur la vitesse du vent mesurée à la bouée est donnée à +/- 1 m/s. La combinaison de ces facteurs avec le niveau de précision du modèle CMOD-IFR2 et du rapport de polarisation utilisée peut expliquer cette surestimation.

Au niveau des stations côtières, la comparaison directe de la vitesse avec la valeur sur les images RSO est plus complexe. D'une part, la ligne de côte est souvent marquée par un changement important du régime du vent (déviation en direction et un brusque changement des vitesses). D'autre part, les stations sont plus ou moins influencées par la partie terrestre selon sa topographie et sa distance à la côte. Si toutes les stations sélectionnées sont à moins de 2000 m de la côte, il y en a 77 % à moins de 1000 m et 55 % à moins de 500 m. De plus, sur les images RSO, la vitesse du vent près des côtes est très variable, et une erreur de localisation géographique des stations météorologiques peut entraîner une modification importante de l'estimation de la vitesse. Pour une comparaison plus raisonnable des vitesses, il faudrait utiliser un modèle météorologique afin d'évaluer la vitesse du vent près de la côte au-dessus de la surface de l'eau à partir des mesures terrestres. Étant donné ces considérations, la corrélation statistique des vitesses du vent est raisonnable et confirme l'intérêt des images RADARSAT-1 pour estimer la vitesse du vent sur le golfe du St-Laurent.

Les valeurs de vitesse du diffusiomètre QuickSCAT présentent une très bonne corrélation avec celles sur les images RSO : biais faible et erreur de 1.5 m/s. Ceci est d'autant plus encourageant que le modèle utilisé pour estimer le vent avec le diffusiomètre QuickSCAT est plus précis que les spécifications initiales (2 m/s). Bourassa et al. (2003) ont obtenu une précision de 0.5 m/s en utilisant des campagnes navales de recherche pour valider la précision du vent estimé par QuickSCAT.

Si les 10 images actuellement traitées ne permettent pas encore de tirer des conclusions définitives sur la localisation des zones de vent, certaines se révèlent très intéressantes pour comprendre la complexité de notre région d'intérêt. Dans cette partie, on se propose d'étudier plus en détails deux situations particulières. Il s'agit des images ScanSAR faisceau SCNA (de 300 par 300 km) acquises le 21 octobre 2002 et le 21 novembre 2002. La large couverture spatiale du faisceau ScanSAR permet l'observation d'une grande variabilité spatiale du vent.

#### Image du 21 octobre 2002

Les mesures à la bouée de Mont-Louis au moment de l'acquisition de l'image indiquent un vent fort de l'ouest avec une mer agitée et une atmosphère neutre (température de l'eau de

surface identique à la température de l'air). La direction du vent est stable pendant 6h avant le passage du satellite RADARSAT-1 (à 22:09 UTC) et on note une vitesse soutenue du vent avec un léger fléchissement avant l'acquisition.

La direction du vent est interpolée à partir des données in situ et des mesures du diffusiomètre QuickSCAT à 22:16 UTC. Le champ de direction du vent est confirmé par la modélisation à la résolution de 25 km du vent sur le golfe obtenue par l'Institut Maurice Lamontagne (IML) pour le 22 octobre à 00:00. Cette modélisation est issue du modèle météorologique GEM du Centre Météorologique Canadien d'Environnement Canada. La figure 3 représente l'image du vent obtenue et la figure 4 la modélisation du vent par l'IML.

Une fois encore, il est capital de se rappeler les nombreuses sources potentielles d'erreurs : localisation, différence terre/mer, effet de la côte (convergence, divergence du vent), turbulence... Visuellement, la zone de l'image à faible angle d'incidence (à l'ouest) semble être sous-évaluée. Ceci confirme la tendance à la saturation du signal radar pour les angles d'incidences faibles (Monaldo, Thompson et al., 2001).

Quoiqu'il en soit, globalement cette image du vent semble très réaliste et montre plusieurs phénomènes remarquables :

- une accélération de la vitesse du vent sur le fleuve dans la direction où souffle le vent;
- le développement d'un corridor de vent modéré à partir de Cap-Chat entre la côte gaspésienne et la zone de vent fort à l'est de l'image;
- la Baie des Chaleurs bénéficie de condition de vent fort.

#### Image du 21 novembre 2002

Les conditions atmosphériques enregistrées à la bouée de Mont-Louis indiquent le passage d'un front froid quelques heures avant l'acquisition de l'image. Ce front est accompagné d'une dépression qui entraîne une augmentation rapide des vents puis une diminution lente 3 h avant le passage du satellite pour atteindre près de 7 m/s (type « brise »). La direction du vent est constante à partir du passage du front à 120 degrés, i. e. vent du sud-ouest. La hauteur de vague augmente régulièrement jusqu'à atteindre son maximum à 22h (type « mer peu agitée »). Au moment de l'acquisition de l'image, la température de l'air est supérieure à celle de l'eau de surface à la bouée pour une atmosphère quasi-neutre. L'image du vent obtenue à l'aide de l'image RADARSAT-1 est présentée en figure 5.

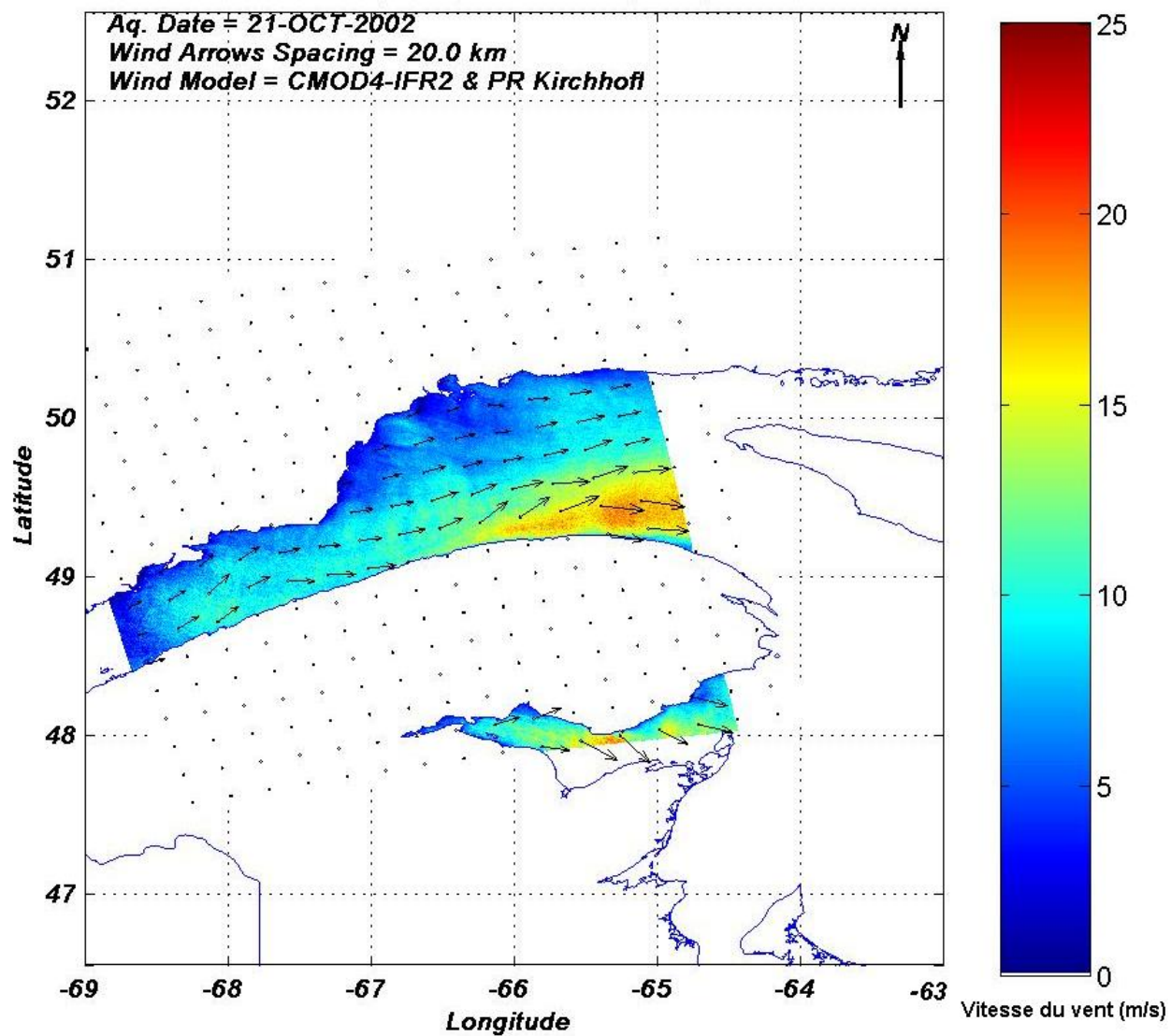


Figure 3. Images du vent (résolution de 400 m) d'après l'image ScanSAR SCNA RADARSAT-1 du 21 octobre 2002, à 22:09 UTC. La direction du vent utilisée est représentée par les flèches noires.



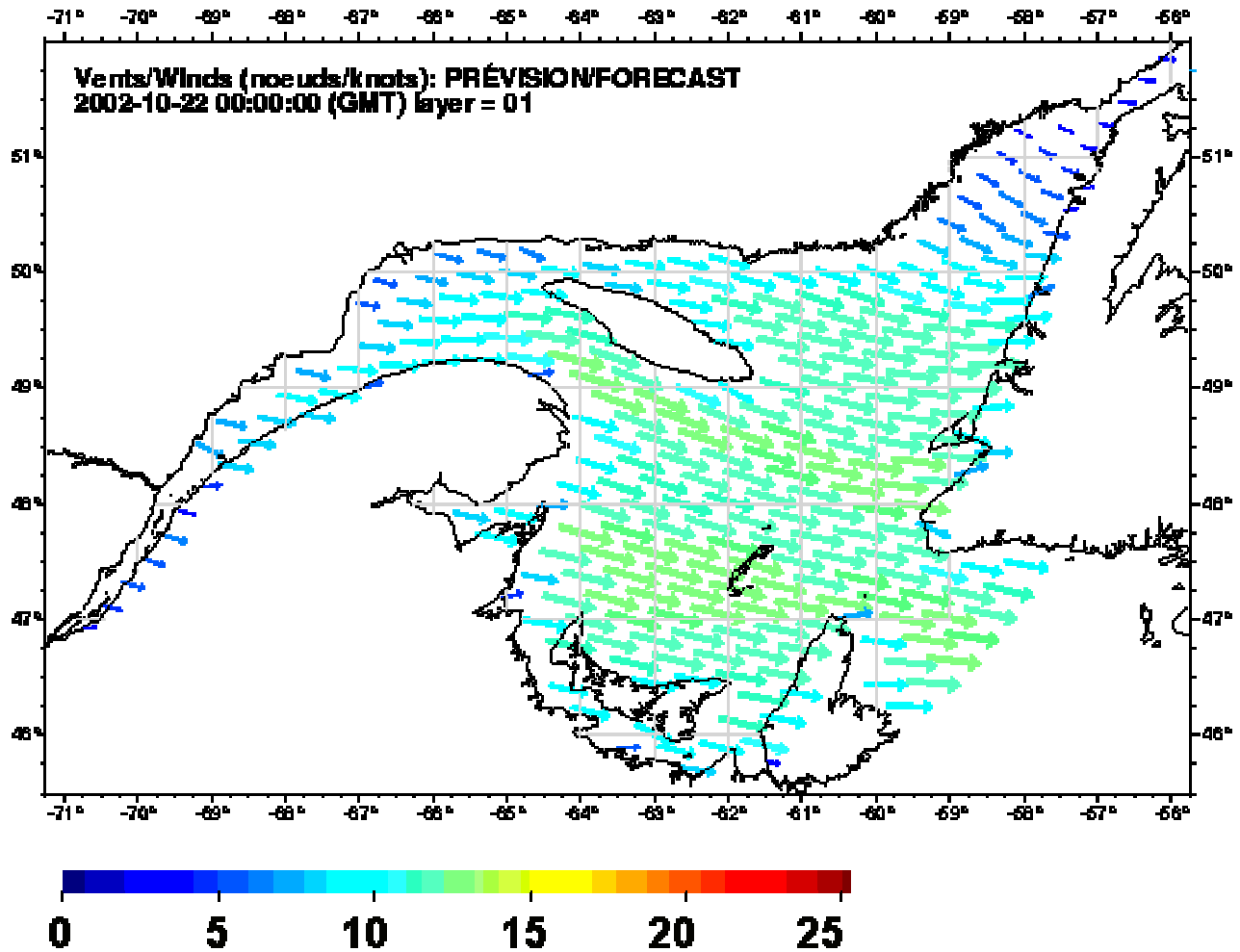


Figure 4. Prévision du vent d'après l'Institut Maurice Lamontagne   00:00 UTC le 22 octobre 2002. Source : [ftp://nordet.qc.dfo.ca/prev\\_maritimes/MET\\_WIND/](http://nordet.qc.dfo.ca/prev_maritimes/MET_WIND/)

L'observation sur la figure 6 de la prévision du vent fournie par l'IML pour le 22 novembre à 00:00 UTC, soit 2 heures après l'acquisition de l'image (22:05 UTC), indique une estimation de la direction du vent identique pour la partie est de l'image. Le champ de direction du vent dévie dans la région de Pointe-des-Monts où nous avons une direction est-nord-est contre est-sud-est sur la prévision IML. Cette différence de direction du vent peut s'expliquer par la faible résolution spatiale du modèle de l'IML et par la difficulté à interpoler spatialement une direction du vent avec des données éparses.

L'échelle de vitesse utilisée sur la figure 5 (0 à 12 m/s) diffère des autres figures afin de mieux visualiser le contraste des vitesses. Dans le cas des images fournies par l'IML, l'échelle a été fixée (0 à 25 m/s) par le centre de recherche et n'est pas modifiable.

Le patron spatial du vent pour cette image est marqu e par plusieurs phénomènes :

- le vent semble être canalis e par le fleuve et acc el er e en débouchant entre l' le d'Anticosti et la pointe de la Gaspésie;
- la côte gaspésienne est caractérisée par une forte variabilité du vent avec la succession de zones de vent faible et fort;
- la région vis-à-vis des monts Chic-Chocs présente un vent très faible probablement dû à un effet d'ombrage par l'orographie de la région;
- la Baie des Chaleurs est une zone de vent faible;
- une bande de vent faible à l'est de Pointe des Monts éventuellement due au passage du front froid enregistr e à la bouée de Mont-Louis 4 à 6h avant 22:00 UTC

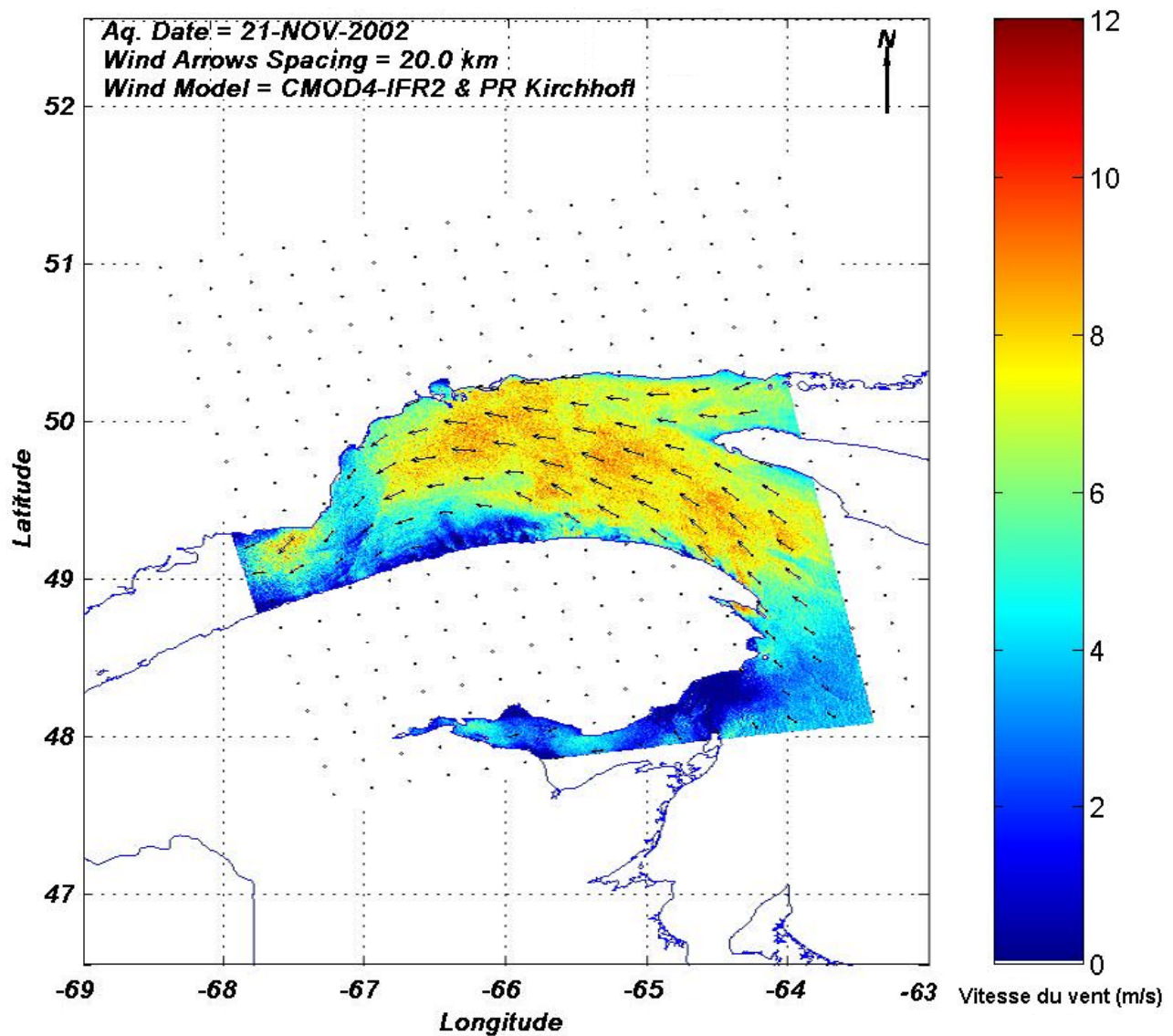


Figure 5. Image du vent (résolution de 400 m) d'après l'image ScanSAR SCNA RADARSAT-1 du 21 novembre 2002 à 22:05 UTC. La direction du vent utilisée est représentée par les flèches noires.

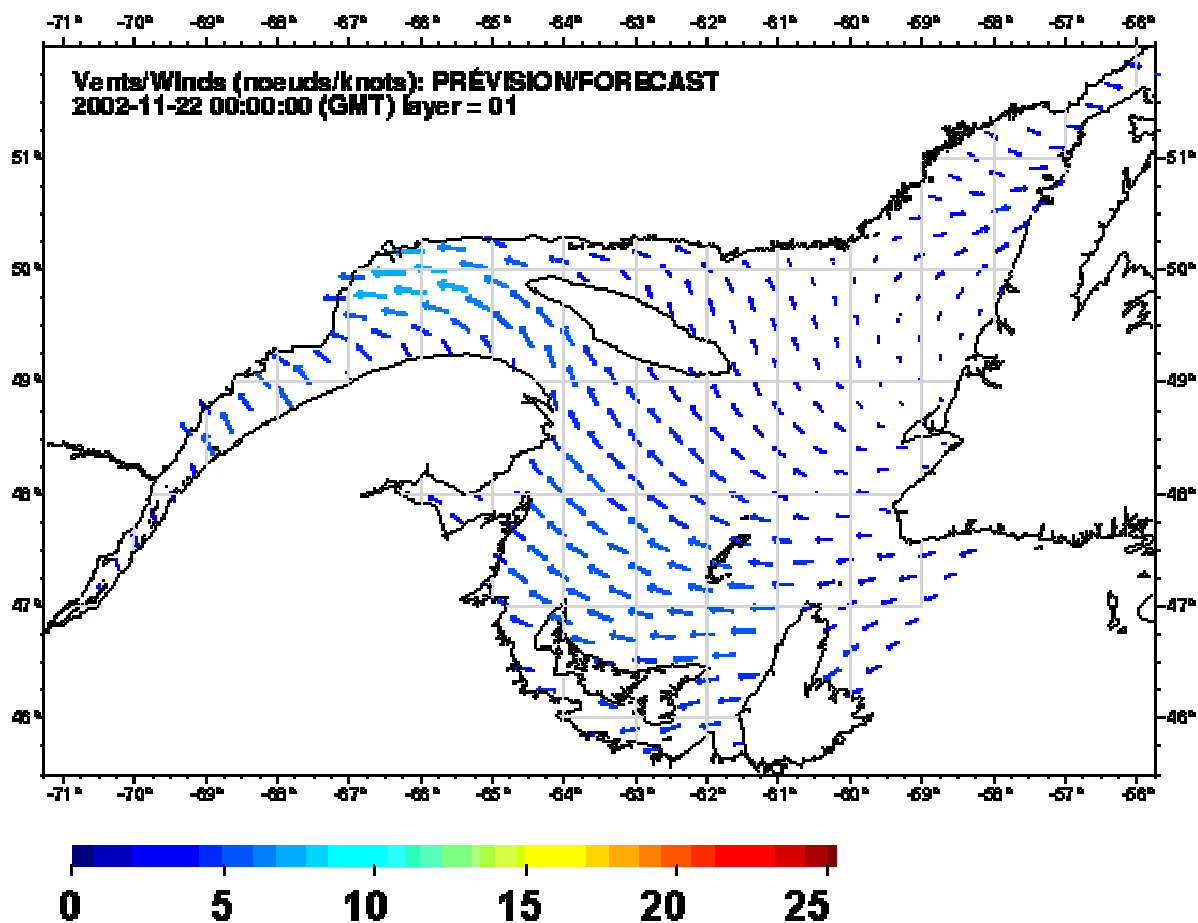


Figure 6. Prévion du vent d'après l'Institut Maurice Lamontagne à 00:00 UTC le 22 novembre 2002.  
Source : [ftp://nordet.qc.dfo.ca/prev\\_maritimes/MET\\_WIND/](ftp://nordet.qc.dfo.ca/prev_maritimes/MET_WIND/)

## Limites et intérêts

Les principales contraintes pour l'utilisation d'images satellites à des fins d'estimation du potentiel éolien sont de plusieurs natures. D'un point de vue technique, la précision de cette méthode dépend de : la qualité des données satellites en terme de précision radiométrique et géométrique, la connaissance d'une information a priori sur la direction du vent et les conditions atmosphériques et océaniques au moment de l'acquisition de l'image.

Le niveau de précision radiométriques des produits RADARSAT-1 permet d'obtenir une information fiable et précise sur la vitesse du vent offshore (RMSE de 1.5 m/s) lorsque les autres paramètres sont maîtrisés (direction, angles d'observation et d'incidence). Le bénéfice de la co-localisation du RSO RADARSAT-1 avec le diffusiomètre QuickSCAT et la présence d'un grand nombre de stations météorologiques terrestres pour la création d'un champ de direction du vent interpolée va être évalué à l'aide d'un modèle météorologique à méso-échelle adaptée aux caractéristiques du golfe du St-Laurent. Cependant, même en l'absence de données sur la direction du vent, l'usage d'une direction fixe (éventuellement déduite de l'observation des structures spatiales de l'image RSO) garantie un résultat convenable (Choisnard, Bernier et al., 2003). Les meilleures estimations du vent sont obtenues lorsque les conditions atmosphériques sont stationnaires et neutres quelques heures avant l'acquisition des images RADARSAT-1. Dans ce cas, le vent est le facteur dominant sur l'état de la mer et la rugosité de la surface de l'eau représente plus finement les conditions de vent local. Une étude est en cours afin de mettre au point un processus de sélection des images RSO pour optimiser la qualité des images du vent. Le modèle utilisé (CMOD-IFR2 et rapport de polarisation) pourra être affiné avec un jeu de données plus important afin de tenir compte des caractéristiques de RADARSAT-1 (gamme d'angle d'incidence, polarisation).

Les limites intrinsèques de cette méthode (coût des images, résolution temporelle faible, acquisition d'images à des heures fixes et la gamme de vitesse limitée entre 2 et 25 m/s) rendent nécessaire le développement d'une stratégie d'échantillonnage des images en fonction des conditions éoliennes dominantes sur le golfe du St-Laurent. L'analyse de la rose des vents et de la distribution de la vitesse à la bouée de Mont-Louis nous permet de sélectionner les cas les plus représentatifs et ainsi développer une base de données sur l'exposition des côtes du St-Laurent. Même si l'estimation du vent à la hauteur de 10 mètres ne représente pas les normes de l'industrie éolienne qui recherche une information à près de 50 mètres, l'apport d'une information nouvelle sur la variabilité spatiale du vent est important. De plus, de façon ponctuelle, une image RSO peut mettre en évidence une zone particulièrement turbulente comme dans le cas de l'image du 21 novembre 2002 avec la région vis à vis des monts Chics-Chocs (ombrage du vent avec probablement une turbulence élevée).

## Conclusions et perspectives

La disponibilité des données spatiales d'observation de la Terre pour de vaste territoire est un atout majeur pour le développement de nouveau système d'information sur le potentiel éolien. Particulièrement pour les régions côtières où la modélisation de l'écoulement du vent est complexe. Pour le golfe du St-Laurent, cette étude a montré le potentiel des images RSO de RADARSAT-1 pour obtenir une information sur la variabilité spatiale du vent à haute résolution (400 m). L'utilisation du modèle CMOD-IFR2 et du rapport de polarisation de Kirchhoff sur les images RADARSAT-1 avec des données du diffusiomètre QuickSCAT et des mesures terrestres locales est encourageante. Sur une dizaine d'image de dimension variable (de 100 à 300 km de couverture), la précision de l'estimation de la vitesse du vent offshore est de 1.5 m/s par rapport aux 70 données QuickSCAT disponibles et se compare avec les mesures côtières avoisinantes avec une erreur de 2.5 m/s sur 52 données.

Le choix adéquat des images RADARSAT-1 et de l'information sur la direction du vent garanti donc une information fiable sur la vitesse du vent lorsque comparée au données in situ et du diffusiomètre QuickSCAT. En particulier, la large couverture spatiale des images ScanSAR de RADARSAT-1 offre une richesse d'information sur la variabilité spatiale du vent intéressante pour une analyse des spécificités du golfe du St-Laurent.

Après avoir démontré l'intérêt d'utiliser les images RADARSAT-1 pour l'estimation de la vitesse du vent, de nouvelles étapes seront nécessaires pour d'une part améliorer la précision de cette estimation et d'autre part développer un outil complet de cartographie du potentiel éolien à partir d'un jeu de données de 25 images RSO :

- valider le champ de direction du vent avec le modèle météorologique méso-échelle du Centre Météorologique Canadien;
- ré-évaluer le modèle radar-vent CMOD-IFR2 couplé au rapport de polarisation;
- finaliser l'échantillon d'images RADARSAT-1 à acquérir;
- proposer un algorithme de cartographie du potentiel éolien pour le golfe et les régions côtières;
- analyser les informations en terme de potentiel éolien pour les régions côtières du golfe du St-Laurent.

Le développement d'applications opérationnelles utilisant des données satellitaires d'observation de la Terre fait l'objet de plus en plus d'attention de la part des agences spatiales. De plus, les lancements du satellite européen ENVISAT en 2002 et du prochain RADARSAT-2 en 2005 assurent la continuité des RSO et permettent le développement de méthode de plus en plus précises pour l'estimation de la vitesse du vent. L'utilisation

croissante des régions offshore pour l'implantation de grands parcs d'éolienne (Long Island, UK, Danemark, Espagne...) devrait favoriser durablement ce type de méthode de cartographie du vent.

### Remerciements

Nous remercions le Dr. Paris Vachon et John Wolfe du Centre Canadien de Télédétection pour nous avoir fourni les outils préliminaires au traitement des images, et nous avoir conseillé tout au long de notre étude. L'Agence Spatiale Canadienne et le Ministère des Ressources Naturelles du Québec sont remerciés pour l'accès aux données RADARSAT-1. Finalement, nous remercions le CRIACC d'Environnement Canada et le MRNQ pour nous avoir permis d'accéder aux données météorologiques. Les données du diffusiomètre QuickSCAT sont disponibles gratuitement via le Jet Propulsion Laboratory sur le site Internet : [http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/qscat\\_data.html](http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/qscat_data.html).

### Bibliographie

- Bourassa, M. A., D. M. Legler, J. J. O'Brien et S. R. Smith. 2003. SeaWinds validation with research vessels. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. C2, pp. 1-16.
- Choisnard, J., M. Bernier et L. G. 2003. RADARSAT-1 SAR scenes for wind power mapping in coastal area: Gulf of St-Lawrence case. Dans *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, CD-ROM Proceedings*, 21-25 July, Toulouse, France.
- Choisnard, J., M. Bernier et L. G. 2003. Cartographie des vents dans le golfe du Saint-Laurent à l'aide de l'imagerie RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. submitted, No. september 2003.
- Du, Y., P. W. Vachon et J. Wolfe. 2002. Wind direction estimation from SAR images of the ocean using wavelet analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 3, pp. 498-509.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, D. P. Rogers, J. B. Edson et G. S. Young. 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. C2, pp. 3747-3764.
- Gerling, T. W. 1986. Structure of the surface wind field from the Seasat SAR. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. C2, pp. 2308-2320.
- Hasager, C. B. 2000. Wind energy mapping using synthetic aperture radar. Dans *Proceedings of Fifth International Winds Workshop, CD-ROM Proceedings*, 28 February - 3 March 2000, Lorne, Australia.
- Henderson, A. R., R. Leutz et F. T. 2002. Potential for floating offshore wind energy in Japanese waters. Dans *International Offshore and Polar Engineering Conference, CD-ROM Proceedings*, May 26-31, Kitakyushu, Japan.
- Horstmann, J., W. Koch, S. Lehner et R. Tonboe. 2000. Wind retrieval over ocean using synthetic aperture radar with C-band HH polarization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No. 5, pp. 2122-2131.
- Horstmann, J., S. Lehner, W. Koch et R. Tonboe. 1999. Computation of wind vectors over the ocean using spaceborne synthetic aperture radar. Dans *A Symposium on Emerging Coastal and Marine Applications of Wide Swath SAR, CD-ROM Proceedings*, 23-25 March, Baltimore, Maryland, USA.
- Johannessen, O. M., H. Espedal et E. Bjorgo. 1999. Wind energy mapping from synthetic aperture radar. Dans *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, CD-ROM Proceedings*, June 1999, IEEE.
- Kim, D. et W. M. Moon. 2002. Estimation of sea surface wind vector using RADARSAT data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, No. pp. 55-64.
- Koch, W. 2000. Semiautomatic assignment of high resolution wind directions in SAR images. Dans *Conference and Exhibition OCEANS, CD-ROM Proceedings*, 11-14 September, Providence, Rhode Island, USA.
- Lafrance, G. 2000. *Optimisation du couple hydro-éolien au Québec et au Labrador*. GAME (INRS) et Hélimax Énergie inc., Varennes.
- Lafrance, G. et E. Bertho. 1998. Le couplage hydro-éolien au Québec et au Labrador: la logique énergétique l'emportera-t-elle sur la logique économique ? *REVUE DE L'ÉNERGIE*, Vol. vol. 501, No. pp. 579-586.
- Monaldo, F. M., D. R. Thompson, R. C. Beal, W. G. Pichel et P. Clemente-Colon. 2001. Comparison of SAR-derived wind speed with model predictions and ocean buoy measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 12, pp. 2587-2600.
- O'Bomsawin, G. et D. Poupart. 1992. *Les secrets du Saint-Laurent - Guide de météo marine*. Environnement Canada - Service de l'environnement atmosphérique Région du Québec, Montréal.
- Perry, K. L. 2001. *SeaWinds on QuickSCAT Level 3 Daily, Gridded Ocean Wind Vectors (JPL SeaWinds Project)*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.
- Quilfen, Y., B. Chapron, T. M. Elfouhaily, K. Katsaros et J. Tournadre. 1998. Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. C4, pp. 7767-7786.
- Sanchez, R., O. Pires et P. Relvas. 2003. Comparison of scatterometer and land-based winds along SW Portugal. Dans *3rd Symposium on Meteorology and Geophysics of PMGA, CD-ROM Proceedings*, 10-13 February, Aveiro, Portugal.
- Sandwell, D. T. 1987. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 14, No. 2, pp. 139-142.
- Shepherd, N. 2000. *Extraction of beta nought and sigma nought from RADARSAT CDPF products*. ALTRIX Systems, Ottawa.
- Smith, S. D. 1988. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. C12, pp. 15 467-15 472.
- Smith, S. R., M. A. Bourassa et R. J. Sharp. 1999. Establishing more truth in true winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, No. pp. 939-952.
- Vachon, P. W. et F. W. Dobson. 1996. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean. *The Global Atmosphere and Ocean System*, Vol. 5, No. pp. 177-187.
- Vachon, P. W. et F. W. Dobson. 2000. Wind retrieval from RADARSAT SAR images: selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 4, pp. 306-313.
- Worthington, R. M. 2001. Alignment of mountain lee waves viewed using NOAA AVHRR imagery, MST radar, and SAR. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, No. 7, pp. 1361-1374.

# LES DYNAMIQUES SOCIALES ENGENDRÉES PAR L'IMPLANTATION DU PARC ÉOLIEN LE NORDAIS

Étienne Lyrette<sup>1</sup> et Michel Trépanier<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Étudiant au Doctorat en études urbaines à l'Institut national de la recherche scientifique – Urbanisation, culture et société, <sup>2</sup>Chercheur à l'Institut national de la recherche scientifique – Urbanisation, culture et société, Courriel : [Etienne\\_Lyrette@INRS-UCS.UQuebec.Ca](mailto:Etienne_Lyrette@INRS-UCS.UQuebec.Ca)

---

**Résumé :** L'implantation d'une infrastructure énergétique, tel un parc éolien, en milieu rural et peu densifié soulève de vives contestations de la part des riverains (syndrome pas dans ma cour –PDMC-). L'analyse de l'implantation d'une telle infrastructure doit, par conséquent, se faire selon des critères qui dépassent les simples avantages environnementaux de cette filière énergétique ou encore l'opposition d'un petit nombre de citoyens.

**Mots Clés :** Énergie ; Éolienne ; Implantation ; Contestation ; Argumentation ; NIMBY

**Abstract** -The social dynamics generated by the implantation of Le Nordais windmills farm- The implantation of a windmills farm in a rural and low-density area can generate some opposition from the citizens who are directly affected by the project (Not In My Back Yard syndrome - NIMBY -). The analysis of the implantation of this type of infrastructure must be done according to criterias that go beyond the environmental benefits of wind energy or the small number of opponents to the project.

**Keys words :** Energy; Windmill; Implantation; Contestation; Argumentation; NIMBY

---

Cette étude a pour objectif principal de mieux comprendre la dynamique sociale entourant l'implantation d'une infrastructure énergétique majeure présentant des risques relativement faibles pour l'environnement en milieu rural et peu peuplé. Pour ce faire, nous regarderons plus spécifiquement le cas du parc éolien Le Nordais qui s'est implanté en Gaspésie et au Bas-Saint-Laurent (Québec, Canada) de 1996 à 1999 (Lyrette, 2003). La décision d'étudier un équipement localisé en milieu rural faiblement peuplé tient au fait que les infrastructures énergétiques continuent à s'implanter dans ces milieux et ce même si l'énergie produite est vouée à quitter la région alors que les risques inhérents aux activités de production sont assumés par la population hôte. Ce genre de situation entraîne, de plus en plus souvent, un mouvement d'opposition où divers groupes s'organisent et tentent de faire avorter ou modifier les projets. Nelkin (1995) souligne d'ailleurs que la question de la distribution équitable du risque sur l'ensemble du territoire est une grande source de tensions. Cela dit, les promoteurs, les politiciens et les autres acteurs impliqués ne peuvent plus prendre ces milieux pour acquis, parce qu'éloignés et peu densément peuplés.

Bien que plusieurs énergies, dites renouvelables, existaient bien avant que la crise du pétrole des années 1970 ne frappe l'Occident, c'est dans ce contexte que plusieurs d'entre elles ont pris leur véritable envol. Certaines d'entre elles, comme l'énergie éolienne, sont techniquement à maturité et peuvent désormais être rentables (Gipe :1996). Mentionnons également que le développement mondial de l'énergie éolienne est appuyé par

certaines politiques qui lui sont favorables. L'accord de Kyoto de 1997 incite les pays adhérents, à une réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord, s'il est respecté, devrait mener à une diminution de la consommation de combustibles fossiles, au profit d'énergies renouvelables. Pour sa part, le Canada s'est engagé, par le biais de ce protocole, à réduire ses émissions de 6 % sous les niveaux de 1990 d'ici 2012 (Environnement Canada, 2002). C'est ainsi que le gouvernement fédéral veut encourager l'installation de 1000 mégawatts de puissance éolienne d'ici les cinq prochaines années par le biais de subventions aux promoteurs. C'est dans ce contexte favorable au développement éolien que le complexe éolien Le Nordais a vu le jour.

Toutefois, même si ce type d'énergie est reconnu comme étant renouvelable et «propre», l'implantation d'un parc éolien, comptant une centaine d'éoliennes, suscite une certaine résistance de la part des communautés touchées. Nous pouvons donc nous demander pourquoi l'implantation d'un parc d'éoliennes, suscite-t-elle la controverse ? L'implantation d'une telle infrastructure provoque bien souvent une levée de boucliers de la part de la population ou de divers groupes qui visent à protéger leurs intérêts. Connue sous le terme générique de syndrome pas dans ma cour (PDMC) ce phénomène de résistance a fait l'objet de beaucoup d'attention. Réalisée pour l'essentiel à partir d'études de cas portant sur des projets «à risque», les projets présentant des risques plus marginaux, tel un parc éolien,

ont fait l'objet de beaucoup moins d'attention. C'est dans cette optique que l'étude du Nordais a été menée.

### Méthodologie

Les informations qui ont été nécessaires à la réalisation de cette étude de cas sont issues des documents déposés lors des audiences publiques menées par le Bureau d'audience publique sur l'environnement (BAPE) sur le *Projet de parc éolien de la Gaspésie* (BAPE, 1997). La richesse, la quantité et la qualité des documents déposés lors de ces audiences nous ont permis de construire le profil argumentaire du promoteur, des partisans et des opposants du projet tout en faisant référence à leur milieu d'appartenance et en établissant les liens entre les acteurs. Nous avons donc réussi, grâce à cette analyse documentaire, à retracer le cours des événements ainsi que les motivations des divers intervenants.

Les territoires visés par l'étude sont les municipalités affectées par l'implantation du parc d'éoliennes. Il s'agit des municipalités de Cap-Chat ainsi que celle de Matane et ses environs (Québec, Canada). La période couverte par l'étude s'échelonne de 1996 à 1999, ce qui correspond à la période d'implantation du parc éolien.

Parallèlement à l'étude de cas mentionnée ci-haut, nous avons également fait un survol du cas entourant la traversée du fleuve Saint-Laurent par la ligne électrique à courant continu de 450 Kilovolts, Radisson-Nicolet-Des Cantons, à Grondines dans la région de la Capitale Nationale (Québec, Canada) (BAPE, 1987). La controverse entourant l'implantation de cette traversée a plusieurs points convergents et divergents avec le cas du Nordais et viendra enrichir sporadiquement l'analyse grâce à des comparaisons entre les deux cas. Nous ferons référence à cette étude complémentaire comme étant le cas de Grondines.

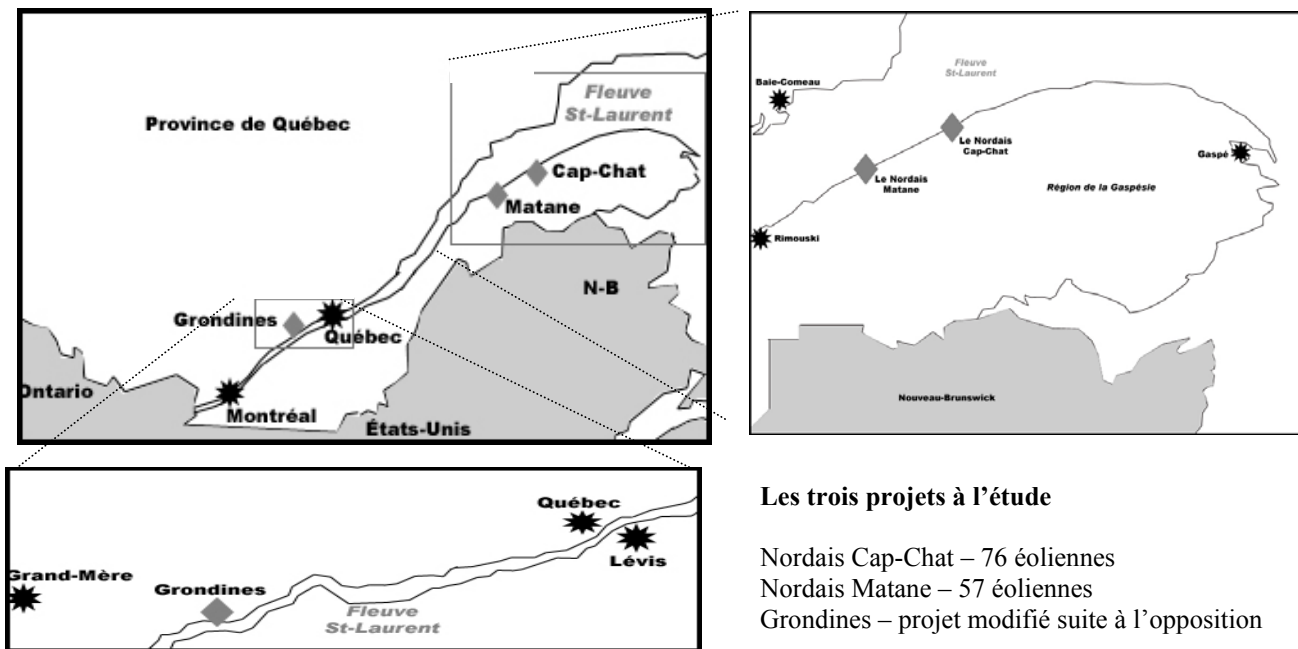


Figure 1 - Localisation des différents projets. Carte, Étienne Lyrette

### Les trois projets à l'étude

- Nordais Cap-Chat – 76 éoliennes
- Nordais Matane – 57 éoliennes
- Grondines – projet modifié suite à l'opposition

### Présentation du parc éolien Le Nordais

Situé à la fois en Gaspésie et dans le Bas-Saint-Laurent, Le Nordais est un complexe éolien scindé en deux sites : l'un à Cap-Chat et l'autre dans la région de Matane (figure 1). Ce dernier est réparti entre les municipalités de Saint-Ulric-de-Matane, de Saint-Léandre et de Saint-Jérôme-de-Matane.

Le site de Cap-Chat, construit en cinq mois, compte 76 éoliennes et ces dernières sont en opérations depuis décembre 1998. Le deuxième site, composé de 57 éoliennes a été mis en service un an plus tard. Le complexe compte un total de 133 éoliennes à axe vertical, pour une puissance installée de 100 mégawatts. Le modèle d'éolienne retenu pour le projet le Nordais est une éolienne sur tour tubulaire d'une hauteur de 55 mètres. Chacune des trois pales de l'hélice mesure 24 mètres pour un diamètre total de 48 mètres (Axor -promoteur -, 2002).



### Les origines de l'opposition; considérations générales

L'opposition face à un parc éolien provient, la plupart du temps, de la population directement touchée par l'équipement. En effet, la perception généralement favorable de l'énergie éolienne diminue le risque d'une vaste opposition dépassant les frontières immédiates de la zone d'implantation. Voilà pourquoi, on observe à l'occasion, une contestation ouverte lorsqu'on interroge uniquement les riverains des installations (Gipe, 1995a ; Gipe, 1995b). Toutefois, ce phénomène d'opposition ne s'applique pas uniquement au cas des infrastructures éoliennes. Il est également repérable dans une multitude de projets tels des lignes de transport électrique, des logements sociaux, des antennes de télécommunication ou encore des sites d'enfouissement sanitaires pour ne nommer que ceux-ci. Comme nous allons le constater dans les lignes qui suivent, l'organisation de l'opposition des riverains semble, selon la littérature, s'articuler de façon relativement semblable dans plusieurs cas.

Au cours de la dernière décennie, les citoyens touchés par l'implantation de divers projets potentiellement nuisibles se sont, la plupart du temps, regroupés en organisations hétéroclites qui apparaissent et disparaissent au gré des projets pour manifester leur désaccord (Mousseau, 1993). Mousseau (1993) mentionne qu'à la base, ces groupes sont composés de «[...] citoyens ordinaires de la majorité silencieuse qui justement décident de prendre la parole [...]» afin de défendre des intérêts communs. Le plus souvent, ces groupes n'ont pas vraiment de philosophie ou d'idéologie précise. Certains auteurs soutiennent que les riverains sont souvent les instigateurs de ces regroupements. Nelkin (1995) va dans ce sens en soulignant que plusieurs personnes s'impliquent, de prime abord, dans le processus d'opposition, parce qu'ils sont riverains du projet. Ils le font bien souvent parce que l'infrastructure vient mettre en jeu leurs intérêts personnels, tels leur santé ou leur qualité de vie. De son côté Catherin (2000) tient un discours semblable et soutient que plus on s'éloigne de l'infrastructure, moins les gens sont préoccupés par le projet, et moins ils sont impliqués dans les groupes d'opposition.

Ces gens se regroupent donc bien souvent à l'intérieur d'organisations ponctuelles qui, selon Lascoumes (1994), sont portées à avoir une vision plus centrée sur la défense d'intérêts «égoïstes». Il mentionne également que ces organisations ponctuelles souffrent souvent d'un manque de crédibilité, contrairement aux organismes plus permanents qui défendent des intérêts plus diversifiés. Ces organismes mieux structurés se multiplient et possèdent des tactiques d'opposition de plus en plus efficaces. Dans le cas de projets à hauts risques environnementaux qui dépassent des considérations locales (impacts fortement localisés sur le territoire ; affectant principalement les riverains), comme des infrastructures issues de la filière nucléaire, des appuis venant de l'extérieur de la communauté se font plus souvent sentir (Nelkin, 1995). Ce sont donc des organisations plus ou moins complexes, selon le type de projet et le type d'enjeux, qui sont mobilisées dans le processus d'opposition à une implantation d'infrastructure.

Cela dit, Catherin (2000) se base sur les travaux de Quéré (1990) et de Schütz (1987) pour souligner que deux types de comportements peuvent être relevés dans une contestation : les conduites implicites et explicites. Selon l'auteur, les associations riveraines relèvent du second type de conduite. Pour ces derniers, il n'est plus question de conduite implicite caractérisée par l'expression «il faudrait faire», c'est plutôt le moment de l'action concrète. Catherin (2000 : 138) mentionne que la conduite explicite « [...] renvoie à la notion d'action, c'est-à-dire à une conduite définie à l'avance fondée sur un projet préconçu. L'intention de mener à terme une situation projetée, en l'occurrence l'annulation de la décision [...]».

#### *Le syndrome pas dans ma cour (PDMC) et l'implantation d'infrastructures*

Le type de regroupement décrit plus haut peut être propice à la naissance du syndrome PDMC. Lake (1993) décrit ce phénomène comme une expression des besoins et inquiétudes des citoyens. Trom (1999 : 37) apporte des précisions et présente le syndrome PDMC comme «[...] l'implantation d'équipements collectifs qui se heurtent à l'opposition des populations locales concernées pour cause de nuisances diverses, attestées, plausibles, ou simplement craintes, inacceptables pour elles, mais parfaitement acceptables partout ailleurs où ces mêmes nuisances ne pourraient les toucher directement». Beaubien (cité dans Mousseau, 1993 : 5) décrit, pour sa part, le syndrome comme «[...]une résistance sociale à accepter sur son territoire tout projet qui menacerait ou qui serait perçu comme une menace à la qualité de la vie». De son côté, Libaert (1998 :78) souligne que l'acceptabilité d'un projet s'est longtemps fait uniquement sur la base de l'intérêt général et que cet état des choses tend à changer : «[...] entre l'intérêt général qui conduit à la réalisation d'une grande infrastructure industrielle et les intérêts particuliers des habitants concernés, l'opinion publique soutient [...] les riverains ».



L'appui populaire aux contestations des riverains vient donc contribuer à complexifier l'implantation d'infrastructure. Mousseau (1993 : 1) va dans le même sens en soulignant la complexité du phénomène touche « [...] directement et indirectement à peu près tout le monde ; décideurs politiques, entreprises d'État ou privées, le domaine des médias, les groupes environnementaux et les citoyens ». Plusieurs auteurs estiment maintenant que le syndrome PDMC dépasse largement les projets très à risque pour l'environnement comme par exemple, un site d'enfouissement ou une centrale nucléaire (Mousseau, 1993 ; Trom, 1999 ; Libaert, 1998). Le syndrome touche donc la quasi totalité des projets de développement nécessitant l'impanation d'équipement ou d'infrastructure. Nous pouvons mentionner à titre d'exemples un centre carcéral, un gazoduc ou encore une autoroute.



Cela dit, les travaux existants semblent plus particulièrement s'attarder aux projets potentiellement nuisibles pour l'environnement ce qui nous amène au constat que les travaux portant sur les parcs éoliens sont peu nombreux. Par contre, Gipe (1995b) s'est penché spécifiquement sur la problématique entourant ce type d'infrastructure. Selon ce dernier, la population n'a rien contre le développement de l'énergie éolienne, mais comme dans bien d'autres situations, elle n'en veut tout simplement pas dans sa cour. Il mentionne également qu'il ne faut pas considérer la quasi unanimité qui entoure l'éolien dans la société comme un support inconditionnel de la population plus directement touchée par l'implantation des éoliennes.

Avant de conclure cette section soulignons qu'une bonne partie de la littérature entourant le syndrome PDMC semble avoir banalisé l'utilisation du terme. En effet, au lieu d'être une notion systématiquement utilisée conformément à sa définition, le syndrome PDMC est souvent utilisé pour discréditer les opposants à un projet. De plus, Wolsink (2003) souligne que le syndrome est également utilisé pour expliquer la quasi-totalité des projets de nature collective qui se soldent par un échec. Lake (1993: 87) souligne d'ailleurs que notre incapacité à enrayer la dégradation de notre environnement, la congestion routière, les sans-abri, la criminalité et la pauvreté sont attribué au syndrome

PDMC<sup>1</sup>. Wolsink (2003) et Lake (1993) tentent de démontrer qu'il est assez peu constructif de considérer systématiquement les opposants comme des individualistes sans vision collective. Cela dit, plusieurs des travaux existants tendent également à présenter les opposants en faisant uniquement référence à leur statut de « riverain » et à expliquer le succès ou l'échec d'une contestation par le simple fait que l'équipement est plus ou moins dangereux et que les personnes touchées sont plus ou moins nombreuses. Or, notre recherche nous a permis de constater que le nombre n'explique pas tout et que les ressources dont disposent les opposants jouent un rôle essentiel dans l'aboutissement ou dans l'échec de leur démarche, entre autres, parce qu'elles déterminent, au moins en partie, leur capacité à « traduire » en enjeux collectifs des préoccupations de prime abord individuelles (Lyrette, 2003). La notion de « traduction » peut se définir comme étant la capacité à traduire en enjeux collectifs des préoccupations de prime abord individuelles pour les rendre socialement acceptables (Latour, 1989; Callon et Law, 1982 ).

Il est donc primordial pour mener à bien une analyse des dynamiques sociales de sortir de ces conclusions simplistes et de constater que les racines de la contestation sont beaucoup plus variées et complexes. Les bases de cette dernière peuvent, effectivement, grandement varier selon l'infrastructure, le milieu et les acteurs impliqués. De plus les stratégies argumentaires des divers intervenants peuvent occulter les réels intentions de ceux-ci.

#### **Quelques constats concernant les dynamiques sociales entourant l'implantation du parc éolien Le Nordais**

Notre analyse du cas du Nordais a montré que le conflit, entourant l'implantation du parc éolien, porte sur une portion bien circonscrite de l'espace (lieux directement touchés par l'implantation d'éoliennes et d'équipements connexes). Nous avons également remarqué que la contestation s'articule, principalement, autour des impacts négatifs sur le paysage et du bruit potentiel qu pourrait engendrer la réalisation du projet. En effet, 44 des 49 (90 %) opposants recensés ont utilisé l'argument de l'impact négatif sur le paysage alors que 30 d'entre eux (61 %) ont mentionné le bruit comme étant un irritant potentiel (Lyrette, 2003). Ces constats sont conformes à la littérature disponible sur le sujet (Cloes du Cota, 2002 ; Chaumel et al., 1996 ; Gipe, 1995a)

Ces principaux impacts négatifs liés au parc éolien affectent directement et surtout les riverains et propriétaires fonciers touchés par l'implantation de l'infrastructure. Les travaux de Lascoumes (1994), Nelkin (1995), Trom (1999) et Catherin (2000) laissent entrevoir l'isolement des riverains dans leur contestation étant donné la nature très localisée des impacts. Notre étude de cas vient confirmer cette conclusion. L'analyse du

<sup>1</sup> «[...]our inability to eliminate environmental degradation, transportation congestion, homeless, crime, and poverty is ascribed to NIMBY» (Lake, 1993:87)

Nordais démontre, effectivement, que l'opposition vient en quasi totalité des riverains (19 agriculteurs, 13 propriétaires fonciers, 8 citoyens des municipalités touchés pratiquant des métiers spécialisés, 3 organismes et groupes locaux, 2 étudiants, 2 s'affichant comme «mère au foyer», 1 propriétaire de résidence secondaire, 1 retraité – pour 49 opposants ayant déposé un document lors des audiences publiques). Aucun groupe externe (partis politiques, groupes environnementaux, etc.) n'est venu appuyer les opposants-riverains dans leur démarche. Les opposants sont donc isolés et marginalisés par les pro-projet et le promoteur (93 entreprises privées, 13 organismes locaux, 11 organismes de développement socio-économique, 8 municipalités, 8 professionnels et experts, 4 organismes gouvernementaux, 3 institutions d'enseignement/regroupements étudiants, 2 syndicats, 1 COOP, 3 «autres» - pour 146 partisans ayant déposé un document lors des audiences publiques). Les acteurs défavorables se voient donc accusés de vouloir entraver le développement de la collectivité pour des considérations purement individuelles (Lyrette, 2003). Les extraits de mémoires qui suivent mettent en lumière cette tendance.

...les opposants

«Je ne suis pas contre que l'on crée des emplois en Gaspésie [par le biais du projet Le Nordais], mais pas au détriment des résidents du Village du Cap. Nous sommes peut-être une minorité, mais nous sommes des êtres vivants qui ont le droit à une qualité de vie.» (Gagnon et al., 1996 : 3)

«[...]j'aimerais conclure en disant que nous, les résidents du Village du Cap, ne sommes pas contre l'exploitation de l'énergie éolienne, et encore moins contre l'emploi, car nous vivons tous dans cette société et avons avantage à travailler ensemble, mais comme nous vivons en démocratie, alors on a le droit de s'exprimer librement, de dire et surtout de faire comprendre aux gens que nous sommes contre l'emplacement choisi, parce que c'est trop près de nos résidences[...]» (Vallée, 1996)

...les partisans

« Est-ce que la population peut accepter de voir ce projet être mis sur une voie d'évitement pour des raisons telles que celles évoquées par quelques opposants ? NON ! Le changement étant toujours un élément d'incertitude pour quelques individus du milieu ou groupements lorsqu'un événement tel que celui qui se présente, nous nous devons de penser au bien collectif et, en regard du projet Le Nordais, je n'ai aucune interrogation que ce projet est essentiel au développement de la région.» (Bernier, 1996 : 5)

«Sommes nous riches à ce point qu'au nom du panorama bucolique qu'offre nos montagnes et nos vallons il nous faille à tout prix exclure tout développement industriel ou autre ? Je pense qu'ici s'applique très bien l'adage des Romains, *Primo vivere*,

*diende philosophare*. Vivre d'abord, ensuite philosopher, écouter, contempler les muses panoramiques.» (Roy, 1996 : 4)

L'analyse du conflit entourant l'implantation du cas du Nordais nous confirme donc que les opposants ont de la difficulté à «traduire» leur discours individualiste en discours collectif (notion de traduction : Latour, 1989; Callon et Law, 1982) et qu'ils demeurent perçus comme défendant leurs propres intérêts. Il est évident que les opposants ne jouissent pas des mêmes moyens que les acteurs favorables. Ils sont confrontés au promoteur, au lobby des entreprises du milieu, aux organismes qui gravitent autour de ce dernier et aux municipalités qui voient dans ce projet des revenus supplémentaires et des emplois potentiels pour leurs citoyens. Les intervenants défavorables n'ont pas les mêmes ressources sociales, économiques, politiques et techniques pour traduire leur argumentation afin de la rendre socialement acceptable; une « traduction » rendue nécessaire en raison de leur isolement.

Pour en arriver à leurs fins, les opposants mettent de l'avant une argumentation de nature esthétique; un argumentaire refuge selon Trom (1999), subjectif, qui leur permet de contester sur des points qui dépendent de la perception de chacun. Comme notre analyse nous l'a fait constater, les opposants au projet Le Nordais n'ont pas réussi à déborder de leur argumentation «subjective», et ce même si, par exemple, il existe des méthodologies pour évaluer de manière plus rigoureuse les impacts sur le paysage (BAPE, 1987). Nous avons pu noter, que les opposants semblent tout simplement ignorer l'existence de ces méthodes ou encore incapables de les utiliser, ils n'en font jamais mention et semblent démunis face à la coalition favorable au projet. De plus, ils n'ont pas de porte-parole bien identifié et manquent de coordination et d'information. Il semble bien que les opposants au projet Le Nordais restent confinés dans cette argumentation, plus par obligation que par choix. En somme, tous ces éléments sont identifiés dans les travaux sur le phénomène PDMC comme étant des facteurs d'échec d'une contestation.

Nous avons également pu remarquer que le milieu (ressources économiques, sociales, politiques, inhérentes au secteur) peut avoir une certaine influence sur les stratégies et le poids des opposants dans l'implantation d'une infrastructure majeure. Les milieux dans lequel a été implanté le parc éolien Le Nordais était, en 1996, un territoire subissant une forte décroissance démographique, qui était faiblement densifié et au prise avec de sérieux problèmes économiques (ISQ, 2002a ; ISQ, 2002b; MIC 2002a ; MIC 2002b). Il nous est permis de présupposer que la faible densité de population a pour effet de minimiser le nombre de gens directement touchés par les divers impacts potentiels. Le fait que peu de personnes soient affectées par les impacts visuels, réduit la base «démographique» de l'opposition. Les promoteurs sont, la plupart du temps, conscients de cette réalité et n'agissent pas systématiquement de la même façon en milieu urbain et rural (BAPE, 1987).

Par ailleurs, il faut aussi bien comprendre que, dans le cas du Nordais, les opposants sont doublement «dominés». Ils ne sont pas uniquement minoritaires en nombre, mais aussi en «pouvoir» et en ressources. Comme l'a montré notre analyse, les opposants n'appartiennent pas à l'élite locale tant au plan politique, économique que social. Il est ainsi plus difficile pour un agriculteur que pour un grand groupe industriel de traduire son intérêt individuel en intérêt collectif. Un industriel peut facilement faire valoir que le développement de son entreprise a un impact collectif, car elle entraînera la création d'emplois dans la communauté. Au contraire, un agriculteur plutôt isolé peut avoir beaucoup plus de difficultés à mettre en évidence une dimension collective à la détérioration du paysage environnant. Les ressources restreintes dont disposent les opposants ont également pour effet de réduire leur capacité à réaliser ou à faire réaliser des études plus rigoureuses des impacts négatifs qu'ils mettent de l'avant pour s'opposer au projet. Nelkin (1984) soutient d'ailleurs qu'une des principales clés pour les opposants est d'en arriver à s'approprier suffisamment de savoir technique afin d'élargir le débat, ce qui est essentiel pour le transposer au plan politique et en faire un enjeu aux yeux de la société civile. Une telle démarche évite aux opposants d'être marginalisés face aux grands lobby favorables au projet. L'utilisation de telles informations est donc, bien souvent un choix stratégique afin d'atteindre une série d'objectifs fondamentaux.

En somme, le projet Le Nordais correspond très bien à ce que les chercheurs décrivent comme un phénomène PDMC suscité par l'implantation d'un parc éolien : les impacts sur le paysage et le bruit occupent une place importante dans la contestation, l'opposition provient en quasi totalité des riverains, l'argumentation des opposants se base sur des arguments «accessibles» et ces derniers sont isolés et ont un minimum de ressources.

Notre analyse du Nordais met par ailleurs en évidence que l'on peut améliorer notre compréhension de la contestation et de son issue si on prend en considération les caractéristiques socio-démographiques des opposants. Les travaux existants tendent à les présenter en faisant uniquement référence à leur statut de «riverains». Or, on constate que les ressources sociales, techniques, économiques et politiques dont ils disposent jouent un rôle essentiel dans la forme que prend leur argumentation et leur capacité à donner du poids à leur contestation en traduisant leurs intérêts individuels en intérêts collectifs. Le cas de Grondines illustre en partie ces propos.

#### *Le cas de Grondines; une comparaison qui porte à réflexion...*

Cela dit, s'il nous est possible d'affirmer que les travaux existants permettent d'expliquer l'échec de la contestation à Cap-Chat et à Matane dans le cadre de l'implantation du Nordais, l'examen du cas de Grondines (figure 1) est très instructif puisque, sur plusieurs points, les caractéristiques de la

contestation sont les mêmes que dans le cas du projet Le Nordais alors que le résultat final est fort différent.

Tout comme dans le cas du Nordais, l'argumentation esthétique est au centre de la contestation à Grondines. S'il est vrai que dans le cas du Nordais, l'argumentation esthétique peut être vue comme un refuge, ce n'est pas le cas à Grondines. En effet, les opposants de Grondines sont, à la base, des riverains appartenant à des municipalités semblables à celles des opposants du Nordais. Mais à la différence de ce qu'on observe à Cap-Chat et à Matane, les opposant-riverains au projet de Grondines se sont, dès le départ, ralliés autour de leur porte-parole, une artiste de renommée internationale (Gagnon, 1988 ; Fortin, 1990 ; Bisonnette, 1998). Cette dernière, appuyée par les opposants locaux, réussit, grâce à sa visibilité et à sa crédibilité en matière esthétique, à attirer l'attention d'une quantité importante d'intervenants en mettant l'emphase sur l'impact négatif du projet sur le paysage. Les opposants ont donc su s'allier une partie de la population et une multitude de groupes influents, les faisant ainsi grandir en nombre, mais aussi en moyens, en connaissances et en expertises. L'amalgame d'acteurs locaux, régionaux et provinciaux donne un poids considérable aux opposants qui, en raison de la diversité et des caractéristiques du réseau d'acteurs qu'ils réussissent à constituer, parviennent à traduire une argumentation individuelle (impact visuel pour les riverains) en enjeux collectifs majeurs. Grâce à cette «traduction», la ligne aérienne n'affecte plus uniquement quelques riverains isolés mais plutôt, la population de la vallée du St-Laurent dans son ensemble. Ce faisant, il devient quasi impossible pour le promoteur de stigmatiser les opposants en les qualifiant d'égoïstes. Les quelques extraits de mémoires qui suivent mettent en évidence cette dynamique.

«En effet, ce projet risque d'endommager gravement et définitivement le potentiel récréo-touristique que représente cette partie de la vallée du Saint-Laurent. Il appartient à tous de protéger ces potentiels naturels et patrimoniaux.» (Union des municipalités du Québec, 1986 : 2)

« L'étude d'Hydro-Québec souligne la valeur patrimoniale élevée de ces paysages [bassin visuel des routes 138 et 132 lors de la traversée du Saint-Laurent à Grondines-Est] mais conclut, fort injustement, à notre avis, que la ligne hydro-électrique s'y insère bien. Nous insistons sur la très grande valeur de ces paysages, patrimoniaux et touristiques qui, dans le cas particulier de Grondines et de ses environs, doit être considéré comme une véritable ressource visuelle québécoise, l'une des rares accessible à partir du réseau routier du ministère des Transports. Nous sommes convaincus que l'implantation de pylônes, dont certains atteindront 50 mètres de hauteur, viendra déstructurer le paysage et constituer une discordance permanente aux yeux des usagers et des riverains de nos routes dans une des principales séquences panoramiques du réseau. Pour ces

raisons, nous recommandons, afin de respecter l'intégrité visuelle de ces paysages, d'y exclure tout pylône hydro-électrique» (ministère des Transports, 1986 :2)

Une argumentation esthétique avec des enjeux localisés peut donc, dans certains cas, mobiliser des groupes externes et transposer une situation à première vue locale, en enjeux nationaux. Il ne faut donc pas considérer l'argumentation esthétique comme étant essentiellement et toujours l'argumentation des «faibles». Ce que nous devons plutôt comprendre, à la lumière de notre étude, c'est que la tournure des événements n'est pas uniquement attribuable à la « nature » forte ou faible des arguments utilisés. Il y a aussi des acteurs forts ou faibles, et c'est également à travers ces derniers que les arguments prennent leur importance.

Les opposants de Grondines ont ainsi réussi à s'organiser et à s'associer une pléiade d'alliés influents, autant sur la scène régionale que provinciale. L'alliance ainsi formée réussit à traduire l'argumentation individuelle en une argumentation collective : ce n'est plus quelques riverains qui seront privés d'un paysage de qualité mais plutôt toute une région et jusqu'à un million de québécois (BAPE, 1987). Ils parviennent ainsi à transposer le débat à l'échelle provinciale et ils ne peuvent plus être marginalisés par le promoteur et les acteurs favorables. Dans ce processus, les arguments qui à Cap Chat et à Matane étaient « subjectifs et individuels » deviennent « objectifs et collectifs ». Leur démarche a porté fruit et le promoteur, Hydro-Québec, a dû revoir son projet de fond en comble et ainsi opter pour une traversée sous-fluviale, ce qui a entraîné une hausse faramineuse des coûts.

Une des différences principales entre les deux contestations tient aux caractéristiques des acteurs impliqués et à leur capacité de «traduction». L'autre tient principalement aux caractéristiques esthétiques des infrastructures et la perception qu'en ont les acteurs. Le caractère inesthétique des deux équipements ne sont pas équivalents et n'ont pas le même poids : le caractère inesthétique des pylônes de transport électrique fait l'unanimité alors que ce n'est pas le cas pour les éoliennes.

Le cas de Grondines montre ainsi qu'il faut prendre en considération les caractéristiques sociologiques des opposants : qui sont-ils ? de quelles ressources techniques, politiques, sociales et économiques disposent-ils ? La mise en œuvre de ces ressources (lorsqu'elles sont présentes et importantes) permet en effet de gagner une contestation qui à la lumière de la littérature PDMC, apparaît pourtant comme une cause perdue. Il faut également considérer le milieu (au sens large) et le contexte dans lequel l'infrastructure est implantée. Le milieu est en fait un «terroir» qui permet ou non aux groupes ou aux individus d'exploiter leurs ressources. Chaque milieu est unique et évolue dans le temps de façon distincte et donne des «outils» aux acteurs. La conjoncture économique prévalant à Matane et Cap

Chat est un outil essentiel pour les partisans du projet Le Nordais tandis qu'à Grondines, l'absence de retombées régionales et une situation économique favorable permettent plus facilement de dire non au projet proposé. Nous remarquons finalement que la capacité des acteurs à mettre en branle leurs ressources sociales, économiques, techniques et politiques est primordiale, mais que les caractéristiques propres à la région d'implantation et la conjoncture qui y prévaut le sont tout autant.

### **Des solutions pour faciliter l'implantation des infrastructures éoliennes ?**

Mormont et Bertrand (2000) soulignent que l'implantation d'équipements pouvant avoir des impacts sur l'environnement, aussi minimes soient-ils, suscite une opposition locale qui requière la participation des citoyens. André et al. (2003) mentionnent qu'une plus grande participation du public peut, effectivement, faciliter la résolution d'une controverse. Ces auteurs mettent en lumière une série d'avantages liée à la participation des citoyens : «...permet d'éviter d'éventuels conflits avec le public, recueillir des informations connues du public et inconnues des autres acteurs, faire émerger des solutions créatrices nouvelles, accroître la confiance du public envers le promoteur, mettre en exergue les valeurs conflictuelles actuelles ou à venir, accroître l'engagement communautaire en regard au projet, témoigner de la transparence et de la volonté d'ouverture et de collaboration des autres acteurs de l'ÉIE» (André et al., 2003 : 221). Toutefois, il existe plusieurs types de participation publique. Nous pouvons mentionner, à titre d'exemple, la participation par consultation (consultation publique), la participation fonctionnelle (audience publique) ou encore la participation interactive (médiation, négociation) pour ne nommer que ceux-ci (André et al., 2003). Nous devons également mentionner qu'au Québec, les démarches de consultation publique (par le biais du BAPE) arrivent relativement tard dans le processus d'évaluation environnementale. Les participants sont donc souvent confrontés à des faits et se sentent exclus du processus de développement du projet. Le schéma qui suit présente un sommaire des étapes du processus d'évaluation environnementale québécois (figure 2).

Dans le cas d'un parc éolien, la disposition des éoliennes est un élément fondamental dans la mise en place du parc. En effet, la disposition joue un rôle décisif sur l'impact visuel qui est considéré comme l'inconvénient majeur dans l'implantation de ce type d'infrastructure (BAPE, 1997 ; Gipe, 1995a; Chaumel et al., 1996 ; Cloes du Cota, 2002 ; Lyrette, 2003). De plus, les éoliennes ne doivent pas être trop proche les unes des autres et doivent être taille et d'apparence semblable afin d'amoinrir les impacts visuels. De telles façons de faire viennent, règle générale, améliorer les chances d'en venir à un terrain d'entente entre les différents acteurs et le promoteur (Dunsky et Perron, 1995; Gipe, 1995a).

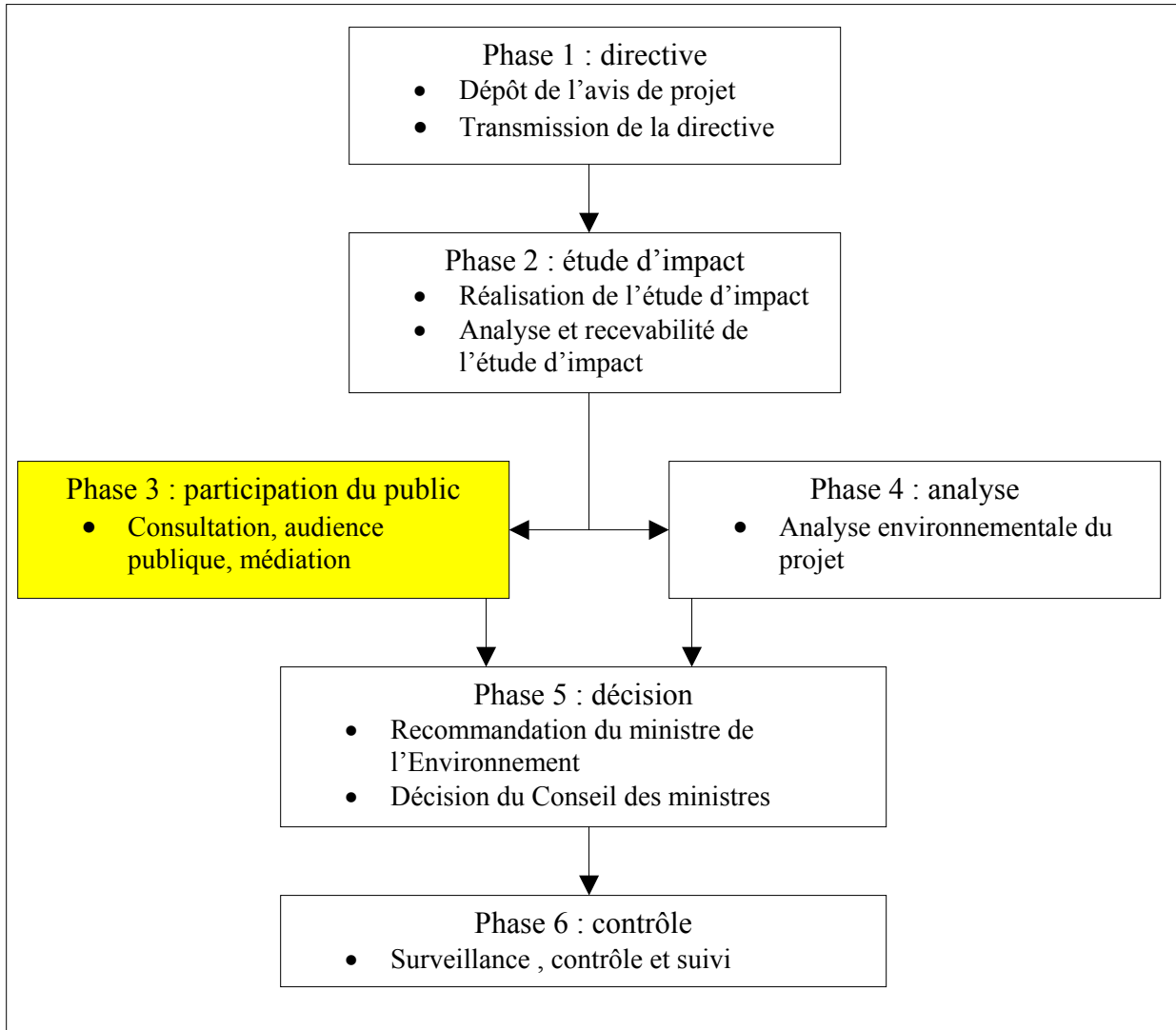


Figure 2. Sommaire des étapes de la procédure administrative – processus d'évaluation environnementale du Québec. Phases : 1,2,4 et 6 sous la responsabilité du ministère de l'Environnement, 3 sous la responsabilité du BAPE, 5 sous la responsabilité du Conseil des ministres. source : inspiré du sommaire présenté par le BAPE lors de consultations publiques

### Conclusion

Notre travail de recherche a démontré que les installations présentant des risques relativement faibles pour l'environnement et la santé publique soulèvent des mouvements de contestation qui peuvent, dans certain cas, être assez influents pour faire avorter ou modifier un projet. Nous avons également constaté que le succès ou l'échec d'un mouvement de contestation réside dans la capacité des opposants à rallier les ressources sociales,

économiques, techniques et politiques nécessaires pour faire contre poids au promoteur et au mouvement pro-projet. Il faut donc retenir qu'il est très hasardeux de prendre à la légère l'implantation d'un parc éolien en se basant uniquement sur les caractéristiques de ce dernier (ressource renouvelable, énergie propre, etc.), ainsi que sur le nombre des riverains s'opposant au projet. Dans un contexte où les émissions de gaz à effet de serre doivent diminuer, le développement de la filière éolienne est particulièrement intéressant. Une meilleure compréhension des

dynamiques sociales entourant l'implantation de parc éolien peut mettre en lumière des pistes de solution pour faciliter leur déploiement.

## Bibliographie

- André, P., Delisle, C. et Revéret, J., 2003, *L'évaluation des impacts sur l'environnement : processus, acteurs et pratique pour un développement durable 2<sup>e</sup> éd.*, Montréal, Presses Internationales Polytechnique, 519 pages.
- Axor. *Parc éolien Le Nordais, Axor réalise le plus important parc éolien au Canada*, (Page consultée le 22 janvier 2002), [En ligne]. Adresse URL : <http://www.axor.com/PAGE5C.HTM>
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1987, *Projet de ligne à courant continu à 450 kv, Radisson-Nicolet-Des Cantons*, Rapport d'enquête et d'audience publique numéro 22.
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997, *Projet de parc éolien de la Gaspésie*, Rapport d'enquête et d'audience publique numéro 109.
- Bernier, P-H, 1996, Mémoire DM51 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le parc éolien de la Gaspésie (rapport du BAPE 109), 6 pages.
- Bissonnette, L., 1998, « Haute tension », *Le Devoir* (Montréal), 24-25 janvier.
- Callon, M. et Law, J., 1982, « On Interests and their Transformation : Enrollement and Counter-enrollement », *Social Studies of Science*, vol.12, p. 615-625.
- Catherin, V., 2000, *La contestation des grands projets publics*, L'Harmattan Inc, 332 pages.
- Chaumel, J.-L., Forum énergie Bas-Saint-Laurent-Gaspésie et université du Québec à Rimouski, 1996, Mémoire DM29 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le parc éolien de la Gaspésie (rapport du BAPE 109), 11 pages.
- Cloes du Cota, G., *Guide des énergies renouvelables (Association pour la promotion des énergies renouvelables (APERE))*, (page consultée le 30 janvier 2002), [En ligne], Adresse URL : <http://www.inti.be/ecotopie/eole.html>
- Dunsky, P. et Perron, B., 1995, *Comparaison technico- économique des options éolienne et solaire-passive avec l'hydroélectricité*, Présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le parc éolien de la Gaspésie (rapport du BAPE 109, document DC11), 44 pages.
- Environnement Canada, *Les mécanismes de Kyoto et le Fonds prototype pour le carbone*, (page consultée le 30 janvier 2002), [En ligne], Adresse URL : [http://www.ec.gc.ca/globe/press/000324-2\\_b\\_f.htm](http://www.ec.gc.ca/globe/press/000324-2_b_f.htm)
- Fortin, R., 1990, « Le tunnel sous le Saint-Laurent d'Hydro-Québec à Grondines est prêt pour l'opération bétonnage », *La Presse* (Montréal), 27 mars, p.B-4.
- Gagnon, Lysiane, 1988, « La pelouse de Mme Beauchemin », *La Presse* (Montréal), 26 janvier, p. B-3.
- Gagnon, L. et al., 1996, Mémoire DM35 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le parc éolien de la Gaspésie (rapport du BAPE 109), 7 pages.
- Gipe, P., 1995a, *Design as if People Matter : Aesthetic Guidelines for the Wind Industry*. (page consultée le 26 novembre 2002). [En ligne]. Adresse URL : <http://www.chelseagreen.com/Wind/articles/Design.htm>
- Gipe, Paul, 1995 b. *Tilting at Windmills: Public Opinion Toward Wind Energy*. (page consultée le 26 novembre 2002). [En ligne]. Adresse URL : <http://www.chelseagreen.com/Wind/articles/Tilting.htm>
- Gipe, P., 1996, « À l'étape de la maturité : l'énergie éolienne », *Écodécision*, No.19, hiver, p.52-55.
- Ibitayo, O.O. et Pijawka, K.D., 1999. « Reversing NIMBY: an assessment of state strategies for siting hazardous-waste facilities », *Environment and Planning C: Government and Policy*, vol.17, no. 4, août, p. 379-389.
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) / a, *Évolution et distribution de la population par région administrative, Québec, 1971-2001*, (page consultée le 6 novembre 2002) [En ligne], Adresse URL : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons\\_regn/l/regional/203.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons_regn/l/regional/203.htm)
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) / b, *Population des MRC et des communautés urbaines, Québec, 1971-2001*, (page consultée le 6 novembre 2002) [En ligne], Adresse URL : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons\\_regn/l/regional/203.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons_regn/l/regional/203.htm)
- Lake, R.W., 1993, « Rethinking NIMBY », *Journal of the American Planning Association*, vol. 59, no. 1, hiver, p.87-96.
- Lascoumes, P., 1994, *L'éco-pouvoir. Environnements et politiques*, La Découverte, Paris.
- Latour, B., 1989, *La science en action*, Édition la découverte, Paris, 451 pages.
- Libaert, T., 1998, « Faire accepter un projet: principes et méthodes », *Communication & langages*, no.117, 3<sup>e</sup> trimestre, p. 76-90.
- Lyrette, E., 2003. *La dynamique sociale entourant l'implantation d'une infrastructure majeure : le cas du parc éolien Le Nordais*. Mémoire de maîtrise. Montréal. Institut national de la recherche scientifique, Urbanisation culture et société. Université du Québec. 176 pages. (sous la direction de Michel Trépanier)
- Ministère de l'industrie et du commerce (MIC) / a, *Conjoncture économique des régions du Québec en 1996, Bas-Saint-Laurent*, (page consultée le 6 mai 2002), [En ligne], Adresse URL : [http://www.mic.gouv.qc.ca/PME-REG/CONJONCT/bas\\_st.html](http://www.mic.gouv.qc.ca/PME-REG/CONJONCT/bas_st.html)
- Ministère de l'industrie et du commerce (MIC) / b, *Conjoncture économique des régions du Québec en 1996, Gaspésie – Île-de-la-Madeleine*, (page consultée le 6 mai 2002), [En ligne], Adresse URL : <http://www.mic.gouv.qc.ca/PME-REG/CONJONCT/gaspésie.html>
- Ministère des transports, 1986, Document B6 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le projet de ligne à courant continu de 450 kv Radisson-Nicolet-Des Cantons (rapport du BAPE 22), 2 pages.
- Mormont, M. et Bertrand, A., 2000, « Oppositions locales et dynamiques d'environnementalisation », *Espace et société*, numéro 101-102, p. 93-112.
- Mousseau, G., 1993, *Comment composer avec le syndrome NIMBY (Not in my back yard) dans l'implantation de projets environnementaux*, Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 102 p.
- Nelkin, D., 1984. « Science, technology, and political conflict: Analyzing the issue », p. 9-25, dans Nelkin D., *Controversy*, Deuxième édition, Beverly Hills: SAGE Publications.
- Nelkin, D., 1995, « Sciences Controversies », p. 444-456, dans JASANOFF S. et al., *Handbook of Science and Technology Studies*, SAGE Publications.
- Quéré, L., 1990, « Agir dans l'espace public », p. 85-112, dans PHARO et QUÉRE (dir.), *Les Formes de l'action*, Éditions de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris.
- Renaud, Y., 2001, « De la contestation à la concertation », *Les annales de la recherche urbaine*, n. 89, p. 62-69.
- Roy, L., 1996, Mémoire DM28 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le parc éolien de la Gaspésie (rapport du BAPE 109), 3 pages.
- Schütz, A., 1987, *Le chercheur et le quotidien. Phénoménologie des sciences sociales*, Méridiens Klincksieck, Paris, 286 pages.
- Trom, D., 1999, « De la réfutation de l'effet NIMBY considérée comme une pratique militante », *Revue française de science politique*, vol.49, no. 1, février, p. 31-50.
- Union des municipalités du Québec, 1986, Document C22-76 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le projet de ligne à courant continu de 450 kv Radisson-Nicolet-Des Cantons (rapport du BAPE 22), 3 pages
- Vallée, M., 1996, Mémoire DM40 présenté au BAPE dans le cadre des audiences publiques sur le parc éolien de la Gaspésie (rapport du BAPE 109), 7 pages.
- Wolsink, M., 2003, « Reshaping the Dutch planning system : a learning process », *Environment and planning A*, vol. 35, no. 4, avril, p.705-723.

# L'ELECTRIFICATION RURALE DECENTRALISEE DANS LE SUD

Nadia Bentaleb, Dr., Directrice Générale de l'ONG Migrations et Développement, Membre du Centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement - C3ED,

Courriel : [bentaleb@wanadoo.fr](mailto:bentaleb@wanadoo.fr)

---

**Résumé :** Dans les pays du Sud, les solutions énergétiques décentralisées sont souvent mises en œuvre dans le cadre de programme d'électrification rurale décentralisée. Dans cet article, nous présenterons les différentes énergies renouvelables utilisées et les conditions de transfert de technologie. Enfin, nous illustrerons quelques pratiques initiées par différents acteurs : l'Etat, les ONGs, le PNUD et les entreprises.

**Mots clefs :** Energie renouvelable, Electrification rurale décentralisée, Environnement, transfert

**Abstract:** In the south countries, the decentralised energy is often used in the rural electrification. In this article, we present the different renewable energy and the technological transfert condition. Finally, we present some practice of actors: the state, the NGO, the PNUD and the entreprise.

**Keywords :** Renewable energy ; rural decentralized electrification ; Environment ; Technological transfer.

---

## Introduction

Dans les pays du Sud, la population rurale demeure encore aujourd'hui importante. Une proportion non négligeable des ménages habite dans des villages isolés ou dans habitations dispersées rendant l'électrification rurale par raccordement au réseau national plus complexe. Les solutions énergétiques décentralisées sont privilégiées à chaque fois que le raccordement au réseau national est jugé coûteux. Mais leur développement nécessite des rythmes de progrès technologique soutenus. Il est vrai que le marché potentiel des énergies renouvelables dans les pays du Sud se caractérise par une demande importante. Il n'en demeure pas moins que les conditions de transferts technologiques du Nord vers les pays du Sud sont loin d'être simples : d'une part, les entreprises doivent mobiliser des moyens logistiques et financiers importants pour permettre les innovations technologiques adaptées au sud ; d'autre part, les conditions d'accès aux marchés locaux sont d'autant plus délicats que les entreprises du nord doivent trouver des partenaires locaux.

Dans cet article, nous commencerons par préciser les différentes énergies d'origine renouvelable utilisées dans le cadre d'une électrification rurale décentralisée (section 1). Puis dans la section 2, nous présenterons les conditions de transfert de technologie. Enfin, dans la dernière section, nous montrerons la difficulté d'inscrire les projets d'électrification rurale dans le cadre du développement durable en raison notamment de l'absence de coordination entre les multiples acteurs présents dans ce secteur.

## *Transferts technologiques*

Nous avons recours au concept de transfert de technologie pour expliquer les faibles niveaux d'électrification rurale dans les pays du Sud. La technologie est composée d'informations et de savoirs liés à l'utilisation même de cette technique pour réaliser des biens et/ou des services. La notion de technique seule ne traduit pas l'idée de mouvement (concept de transfert) vers différents réseaux comme les organisations et les individus (Gibson, 1997). La circulation des informations contenues dans la technique se heurte tout au long de l'échange à des contraintes dues à la présence d'acteurs devant coopérer alors qu'ils appartiennent à des mondes différents tant d'un point de vue structurel, que culturel et organisationnel. La production et la diffusion d'une technologie forment alors un processus profondément *encastré* dans l'économie et le social (Radošević, 1999). Il y a autant de types de transfert qu'il y a de canaux de diffusion des technologies.

## *Les différentes solutions énergétiques*

Parfois, les solutions décentralisées sont plus rentables que les solutions réseaux. C'est le cas par exemple lorsque la distance du site rural au réseau national est importante ou encore lorsque l'Etat favorise ce type d'installation, en instaurant des mesures favorables aux bénéficiaires (populations concernées et communes rurales). Elles demeurent encore à l'heure actuelle faiblement diffusées. Jusqu'en 1992, la capacité installée des systèmes photovoltaïques dans le monde était à 91% concentrée aux Etats-Unis, dans l'Union Européenne et au Japon (Muntasser, 2000). Actuellement, le partage s'effectue davantage vers les pays du Sud, même si les principaux producteurs de systèmes

photovoltaïques se trouvent dans les pays développés. La capacité photovoltaïque installée est d'environ 20% en Amérique du Nord, 25% en Europe, 30% en Asie pacifique et Japon, 6% en Chine et en Inde, 12% en Afrique, 5% en Afrique du sud et 2% dans le reste du monde. Dans les pays du Sud, les principales énergies renouvelables pouvant être utilisées pour réaliser une électrification rurale décentralisée sont :

- la biomasse,
- l'énergie solaire photovoltaïque, solaire thermique,
- l'énergie éolienne,
- l'énergie hydraulique,
- l'énergie provenant du biogaz.

Nous allons passer en revue, les principales applications pour chacune de ces sources d'énergie.

### La biomasse

De nombreux programmes ont été développés pour permettre la généralisation des foyers dits « améliorés ». Ces derniers permettent de rationaliser la consommation du combustible bois ou charbon de bois. Dans les années 1990, au Mali, le programme « Stratégie Energie domestique » a permis la diffusion de 15000 foyers améliorés par an<sup>1</sup>. L'enquête effectuée par l'ESMAP en 1990, dans le cadre de ce programme permet de réfuter certaines idées reçues. Cette étude a été réalisée auprès d'un échantillon permanent statistique représentatif de chacune des principales villes du Mali : Bamako, Gao, Kayes, Mopti, Ségou, Sikasso et Tombouctou soit au total 2000 ménages. Il apparaît que cuisiner au charbon de bois avec un fourneau de type « malgache » ou même avec un fourneau amélioré mal utilisé, revient au même prix, voire plus cher que cuisiner au pétrole ou même au gaz. Il faut 7 kilogrammes de bois pour produire un kilogramme de charbon. Compte tenu du pouvoir calorifique et des faibles rendements des équipements utilisés, il faut couper deux à trois fois plus d'arbres pour pouvoir substituer du bois au charbon de bois. En milieu rural, outre la non-incitation économique (le bois collecté reste gratuit), la modification du foyer se heurte à des considérations socio-

<sup>1</sup> Le programme « Stratégie Energie Domestique » a été réalisé grâce à l'appui du programme « Energy Sector Management Program » (ESMAP) de la Banque Mondiale et du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). Le projet a été financé par différents bailleurs de fonds : le gouvernement des Pays Bas, le Fonds pour l'Environnement Mondial (GEF) et la Banque Mondiale, ainsi que des organisations de coopération internationale telles que le Bureau international du Travail (BIT), les Gouvernements de Norvège et de Suisse, l'Union Européenne et l'Agence Française de Développement (AFD). Ces informations ont été récoltées auprès de Ismail Touré à Bamako, directeur de coordination et de la supervision de la mise en œuvre au Ministère des Mines et de l'Energie, lors de la mission de terrain en Juin 2000.

culturelles (vision de la flamme, présence de la fumée, chauffage, éclairage, goût spécifique...). Des tests de dégustation effectués dans des quartiers de Bamako dans le cadre de ce programme ont montré que seules les femmes les plus âgées ont su reconnaître si le riz a été cuit au bois ou par un autre combustible du fait de son « craquant ». Mais aucune n'a pu détecter la différence de goût selon que la sauce était préparée au charbon de bois, pétrole ou gaz. Les succès les plus probants de l'utilisation des foyers améliorés ont été obtenus au sein de collectivités ou dans les grandes activités artisanales (fours de grande capacité) où l'intérêt d'économiser la biomasse est le plus marqué.

La densification de la biomasse ou compression mécanique de différents produits de la biomasse (résidus agricoles, poussières de charbon, sciure...) est un procédé utilisé lorsqu'il y a des facilités de transports.

### L'énergie solaire thermique

Il existe trois principales utilisations de l'énergie solaire thermique : 1) les séchoirs solaires ; 2) les chauffe-eau solaires ; 3) les cuiseurs solaires.

*Les séchoirs solaires* transforment la chaleur en énergie solaire par interposition d'une matière dense et opaque. Le rendement moyen est de 4 à 6 kWh par m<sup>2</sup> et par jour en temps clair. Le séchage, dans un séchoir solaire, peut être réalisé de différentes manières : par exposition du produit au rayonnement solaire, par ventilation naturelle ou forcée en utilisant un moteur électrique, ou encore par un système tout solaire ou hybride (une énergie d'appoint autre que solaire permet de chauffer l'air lorsque le rayonnement n'est pas suffisant). L'investissement dans ce type de séchoir est rentabilisé lorsque la maîtrise de la qualité du produit séché permet de dégager soit une forte valeur ajoutée, soit d'augmenter la durée de conservation des produits et/ou de diminuer le volume des pertes des récoltes.

*Le chauffe-eau solaire* est caractérisé par un capteur solaire avec stockage ou non de l'eau chaude et par la circulation de l'eau chaude (thermosiphon), ou forcée (pompe électrique). Ces systèmes sont généralement destinés au milieu urbain. Des applications industrielles sont également envisageables (préchauffage de l'eau pour différentes applications nécessitant eau chaude ou vapeur).

*Les cuiseurs solaires* sont de trois types : 1) les concentrateurs qui renvoient le rayonnement sous le récipient de cuisson ; 2) les cuiseurs boîtes munis ou non de réflecteurs extérieurs qui consistent en des caisses isolées avec une surface vitrée ; 3) et les cuiseurs à capteur plan où un fluide (air, huile) est chauffé puis conduit jusqu'au caisson de cuisson. Leur utilisation ne pourra se substituer complètement au foyer traditionnel car leur usage dépend de conditions climatiques favorables (temps non couvert, cuisson hors période diurne...). Mais la principale difficulté demeure l'inadéquation aux habitudes locales, les cuiseurs ne pouvant entièrement couvrir l'ensemble des besoins de cuisson.



De ce fait, les dépenses en bois et ou en gaz demeurent incompressibles.

### L'énergie solaire photovoltaïque

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standard fournissent une puissance moyenne de 100 W par m<sup>2</sup> (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. Elle permet un service proche du service rendu par le réseau électrique au niveau de la qualité de l'éclairage. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production.

*Les systèmes photovoltaïques* sont assez diffusés pour l'éclairage et l'alimentation d'une prise pour l'audiovisuel au Maroc, Kenya, Zimbabwe, Indonésie, Mexique ou au Brésil.

*Les pompes solaires* sont des pompes électriques alimentées par un générateur photovoltaïque. On distingue deux types de pompes : 1) les systèmes au fil du soleil sans stockage de l'énergie : le débit de l'eau est proportionnel à l'énergie lumineuse avec nécessité de stocker l'eau ; 2) les systèmes équipés de batteries (de moins en moins utilisés). Ces deux types de pompes demeurent toujours non compétitifs par rapport aux pompes diesels car les coûts d'investissement sont élevés.

### Energie éolienne

Les systèmes éoliens permettent de récupérer l'énergie liée au déplacement des masses d'air. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent (proportionnelle au cube de la vitesse) et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur) : Ces systèmes demandent une bonne technicité. Si l'on excepte l'Inde et la Chine, peu de pays en développement en fabriquent. Les projets demeurent encore à l'heure actuelle des projets pilotes, sauf au Maroc ou en Mauritanie, car ces applications exigent des sites ventés et des niveaux d'investissement élevés. Les puissances obtenues sont variables selon la vitesse du vent et la taille des pales, récapitulées dans le tableau 1.

Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 kW. C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum.

### L'énergie thermique contenue dans le biogaz :

Par fermentation hors de l'oxygène, les composés organiques (déjections humaines et animales) produisent du méthane appelé biogaz. Ces digesteurs se caractérisent par leur capacité (6-12 m<sup>3</sup> pour un modèle familial et plus de 100 m<sup>3</sup> pour les unités industrielles) et leur type d'installation :

- Le type chinois à dôme fixe produit de 0,15 à 0,3 m<sup>3</sup> de biogaz par jour en moyenne sur l'année,
- Le type indien à dôme flottant produit de 0,3 à 0,6 m<sup>3</sup> de biogaz par jour en moyenne sur l'année.

Le biogaz est utilisé pour la cuisson des aliments et l'éclairage et l'effluent solide constitué par fermentation des composés organiques, comme engrais azoté.

Bien que diffusés à des millions d'exemplaires (plus de 10 millions en Chine), les digesteurs peuvent se heurter à des tabous liés à l'usage d'excréments humains ou animaux. De plus, des contraintes techniques demeurent et elles sont dues : 1) à la disponibilité en eau ; 2) au démarrage lent du processus bactériologique. En hiver, dans certaines régions où les températures sont basses, il est nécessaire d'utiliser un petit groupe diesel pour démarrer la fermentation ; 3) à la difficulté de stockage et du transport du gaz.

Surface balayée (m <sup>2</sup> )	Diamètre (m)	Vitesse moyenne (m/s)			
		4	6	8	10
1	1.1	0.019	0.063	0.150	0.292
4	2.3	0.075	0.253	0.599	1.170
10	3.6	0.187	0.632	1.520	2.920
40	7.1	0.749	2.530	5.990	11.700
100	11.83	1.870	6.322	15.011	29.211

Tableau 1. Puissances moyennes produites en Kw. Source : [http://www.matrixenergy.ca/ap/rp\\_wind\\_2.htm](http://www.matrixenergy.ca/ap/rp_wind_2.htm)

## L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment. En milieu rural, les exigences de l'eau pour l'irrigation sont prioritaires par rapport à la production d'énergie électrique. La petite hydro-électricité est très répandue en Asie (plus de 8000 nano-centrales ou petites centrales en Chine) et en Amérique latine, où sont produits des milliers de MW. Si les coûts initiaux d'investissement de la petite centrale sont élevés et se justifient lorsqu'il n'y a pas de réseau électrique, les coûts de fonctionnement sont par contre faibles. Les coûts du kW varient selon le niveau de la puissance installée et selon que le matériel est importé ou pas.

### Résumé sur les énergies renouvelables

En résumé, les coûts d'investissement pour l'utilisation des énergies sont fonction des politiques de subvention ainsi que des temps de retour sur investissement. Les applications électriques renouvelables ont atteint un niveau de maturité technologique uniquement pour les faibles puissances. Elles sont donc plutôt adaptées pour des usages domestiques ou communautaires et pas suffisamment mûres pour des usages productifs. Les blocages majeurs restent socio-économiques. En l'absence d'innovations dans les modes de diffusion, de promotion, de gestion institutionnelle des projets et de suivi par une gestion de la maintenance adaptée, ces blocages font que l'électrification rurale décentralisée concerne davantage des programmes pilotes que des projets de grande envergure.

### Etapes de transfert technologique

Selon Gibson et Rogers (1994), les transferts de technologie comprennent quatre niveaux (figure 1) :

*Niveau I Qualité et R&D* : les chercheurs communiquent les résultats de leurs travaux. A ce premier stade, le transfert est encore passif et les chercheurs doivent affronter différentes barrières pour assurer la *publicité* de la technique.

*Niveau II Acceptation* : c'est le début du partage des connaissances entre les développeurs et les utilisateurs. Cette phase conduit souvent à des ajustements de la technique par les chercheurs pour permettre l'exportation de la technique. Cela conduit à des adaptations sur le terrain qui s'inscrivent dans le registre de la "débrouille" et restent entièrement à l'appréciation des hommes de terrain. Ici, l'on prend conscience que la diffusion de telles technologies ne peut pas uniquement être réalisée en laboratoire. Des adaptations sur le terrain sont nécessaires pour les rendre accessibles et utiles aux populations destinataires. L'homme de terrain chargé de mettre en place de tels systèmes doit alors réaliser les adaptations avec de faibles moyens, si possible avec des matériaux disponibles dans le pays d'accueil en raison des coûts importants de ces systèmes.

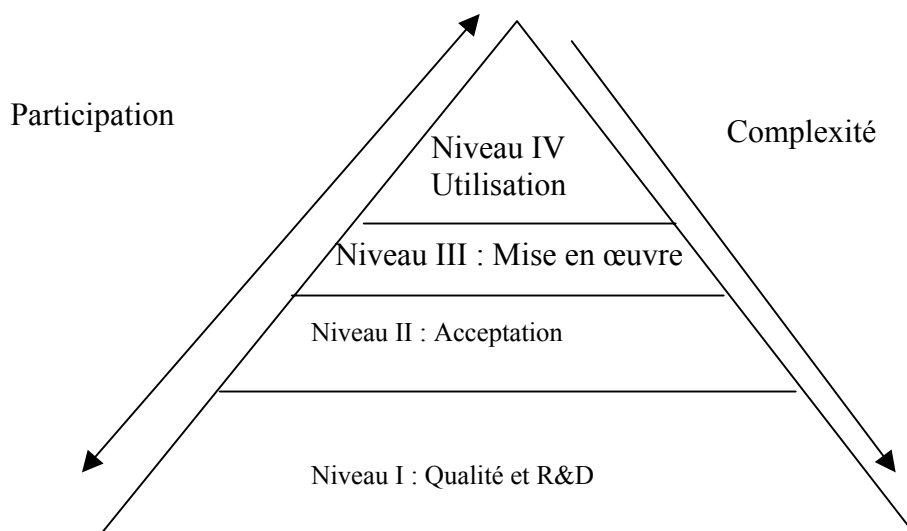


Figure 1. Niveaux de transferts de technologies. D'après Gibson et Rogers, 1994.

Au Vietnam, partant du constat que l'éclairage sert essentiellement pour réaliser les devoirs scolaires du fait de la prime que les parents perçoivent, un chercheur R&D d'EDF a conçu un système électrique efficace en protégeant les lampes incandescentes de tous les insectes attirés par la lumière, en perçant un saladier. Ainsi le nettoyage est facilité et la diffusion de l'éclairage est plus ciblée. De plus, il assure la mobilité de la lampe à une autre pièce, car les devoirs scolaires finis, la lampe est utilisée pour éclairer d'autres activités. A travers cet exemple, il apparaît que l'on est passé de la recherche « *théorique* » à la recherche « *industrialisée* » liée à l'entreprise. « La recherche est dans ce cas orientée *mission* » (O'Connor M *et al.*, 2001).

*Niveau III : Mise en œuvre* : C'est à ce stade, que les exploitants de la technologie sont chargés de la tester. Ils doivent avoir le savoir et les ressources pour mettre au point la diffusion de la technique.

*Niveau IV : Utilisation* : la technique est commercialisée et le succès de la diffusion peut être apprécié en terme d'acquisition de nouvelles parts de marchés à long terme. A ce niveau, la question d'appropriation de ces techniques aux besoins socio-économiques des utilisateurs locaux est essentielle. Elle conditionne la pérennité de l'utilisation des techniques.

Les transferts de technologies énergétiques supposent souvent le transfert de plusieurs technologies en même temps pour une utilisation donnée : pour assurer le pompage par un système photovoltaïque, nous pouvons distinguer plusieurs composantes reposant sur une myriade de technologies différentes. Si nous ajoutons à cela, la variété des niveaux de circulation des informations, nous sommes en présence d'un processus *complexe*. C'est en ce sens que la distinction de plusieurs étapes aide à la compréhension des différentes participations qui se construisent entre les acteurs.

Pour résumer, la notion de transfert technologique doit, de ce fait, être entendue dans un sens large. Dans les différentes étapes de transfert de technologie, il y a lieu de tenir compte de 3 points essentiels : le niveau de définition des besoins, le niveau de formation qui doit intervenir le plus tôt possible au moment de la mise en œuvre, et le niveau de suivi d'impacts de la technologie. Le transfert de technologie comprend aussi bien les phases qui vont de la conception à la fabrication et à la commercialisation des biens et/ou des services énergétiques que l'appropriation finale par les usagers. Nous comprenons alors, que le passage de ces différents niveaux constitue un *labyrinthe* qui peut comporter plusieurs voies sans issues.

*Des taux d'électrification faibles : une explication par les transferts de technologies*

Le faible niveau d'électrification dans les pays du Sud s'explique par plusieurs raisons : la faible densité de la population, le coût parfois prohibitif pour les populations, la multiplicité des normes,

le manque de maintenance, des conditions géographiques inadaptées... mais aussi l'insuffisante percée des solutions énergétiques décentralisées<sup>1</sup>. En raison de l'accès difficile des populations rurales, les systèmes décentralisés permettent la satisfaction de besoins énergétiques, sans supporter les coûts élevés de connexion au réseau national. Cela n'empêche pas, lorsque la densité de la population rurale est importante, de réaliser des mini-réseaux décentralisés. Le retard de la diffusion des techniques décentralisées ne tient pas à l'inexistence de systèmes opérationnels mais à la lenteur que connaît la diffusion de ces applications, rendant les économies d'échelle encore très faibles. La thèse de Solow (1957) selon laquelle le rattrapage des pays développés par les pays du Sud dépendrait des modalités de transfert technologique repose sur une hypothèse forte et irréaliste, qui stipule que la technique est aisément reproductible et transférable. Depuis, les nouvelles théories de la croissance endogène ont largement réfuté cette thèse. Mais sans partager l'idée d'un impossible rattrapage prônée par ces dernières théories, force est de constater que le développement énergétique est fonction de la vitesse de diffusion des techniques. Les pays du Sud se caractérisent par une faible diffusion des techniques. Cette situation n'est pas inédite mais elle a été largement illustrée pendant la révolution industrielle en Europe. L'utilisation massive de l'énergie à des fins productives ne s'impose que très lentement. Hors Royaume Uni, il aura fallu trois quarts de siècle en Europe pour que la production de la fonte de fer soit réalisée simultanément par le charbon de bois, puis par les machines à vapeur, puis finalement par le charbon de terre. Trois quarts de siècle se sont également écoulés entre la pompe à feu de Newcomen en 1705 et la machine à vapeur de Watt en 1782. Il faudra près d'un demi siècle avant la mise au point par Marc Seguin en 1828 de la chaudière tubulaire qui seule assurera la motorisation des locomotives, puis encore une trentaine d'années avant que la navigation à vapeur devienne rentable (Meignen, 1996). Nous pourrions multiplier les exemples pour souligner qu'il faut un temps avant que le forgeron maréchal-ferrant, vendant et entretenant l'outillage agricole, ne se mette à réparer et à fabriquer des vélos avant de transformer son atelier en garage. Il peut arriver que les ressources disponibles localement favorisent une accélération dans la diffusion d'une technologie. Si nous comparons les développements asiatiques et africains, nous constatons qu'en Asie, la présence de nombreux cours d'eau, a permis la diffusion de l'énergie hydraulique. En Asie 20% du potentiel hydroélectrique contre seulement 5 % en Afrique sont exploités. Le potentiel de croissance est donc important, en particulier dans les pays émergents et en développement. De

---

<sup>1</sup> On entend par solutions énergétiques décentralisées, les solutions permettant la satisfaction de besoins énergétiques à partir de systèmes énergétiques produisant l'énergie localement de source renouvelables comme les systèmes photovoltaïques, éoliens ou hydrauliques mais aussi non renouvelable comme les groupes électrogènes. Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive, et peut comprendre d'autres sources de production d'énergie.

plus, la production d'origine hydroélectrique est environ 5 fois plus importante en Asie comparativement à l'Afrique.

TWh/an (1995)	Grandes centrales	Petites centrales	Totale
Afrique	65.4	1.6	67
Asie	291	42	333
Monde	2265	115	2380

Tableau 2. Production hydroélectrique. Source: *Water Power and Dam Construction*, 1995 et *International Journal on Hydropower and Dams*, 1997.

Par contre, en Afrique malgré le potentiel solaire existant, l'énergie solaire progresse difficilement en raison notamment d'un marché solvable restreint et des investissements lourds. Certains composants des systèmes photovoltaïques nécessitent une grande capacité d'investissement, une main d'œuvre hautement spécialisée, la disponibilité d'énergie électrique bon marché et des produits spécifiques comme les gaz purs. Une étude réalisée en 1987 pour le compte du Centre de Recherche sur l'Énergie Solaire de Bamako (Mali) montre que la production d'une usine de photopile d'une capacité de 300 kWc, à construire au Mali, exige un investissement de 5 millions d'Euros et un surcoût de l'énergie électrique de l'ordre 500% par rapport à une usine en France (Bennallou et Rodot, 2002).

Les entraves à la diffusion des systèmes énergétiques décentralisés sont de plusieurs ordres:

L'investissement en système de production décentralisé d'énergie est souvent hautement capitalistique pour des populations ne disposant que de faibles revenus. Le marché d'occasion est caractérisé par de faibles échanges et ne permet pas toujours le remplacement d'un élément défectueux de systèmes photovoltaïques par exemple<sup>2</sup>. Souvent les constructeurs vendent un système complet avec toutes les composantes à assembler. Les constructeurs sont tenus de respecter certaines normes dans la fabrication de chaque élément du système pris individuellement. Mais il n'existe pas à proprement parler de standards dans la comptabilité d'éléments provenant de systèmes différents. L'adaptation d'une composante d'un système photovoltaïque à un autre nécessite un savoir théorique qui n'est pas à la portée immédiate des ruraux. L'un des autres freins au développement des énergies renouvelables est l'absence de standardisation des techniques. En effet, la concurrence entre les différents fabricants, entraîne des verrouillages technologiques qui ne favorisent pas la compatibilité des différents équipements. Cette

<sup>2</sup> Un système photovoltaïque est composé d'au moins une batterie, d'un régulateur, d'un ou plusieurs panneaux solaires et parfois d'un onduleur.

situation contribue à accroître la dépendance à l'extérieur des pays du Sud si le marché intérieur n'est pas suffisamment alimenté en pièces de rechange. De nombreux équipements ne peuvent être réparés lorsque les pièces courantes ne peuvent être remplacées, faute de pouvoir se les procurer.

Les pré-requis pour la compréhension des modes de fonctionnement des équipements sont nombreux. En l'absence de sessions de formation institutionnalisées, les règles fondamentales de fonctionnement ne sont pas assimilées. Cette situation a des conséquences d'autant plus négatives que le matériel est livré dans les pays avec des notices insuffisamment détaillées, lorsqu'il n'y a pas confusion des notices d'utilisation entre des matériels différents. « L'ensemblier doit fournir une notice claire avec plans s'il s'agit d'une grosse réalisation ou avec une notice facile à utiliser et à la portée de l'utilisateur si ce dernier doit effectuer le montage lui-même (pour un kit par exemple) » (Courillon, 2000).

Si l'on ajoute à cela, l'absence de mise en garde des populations contre les dangers potentiels d'utilisation des matériels électriques, les règles les plus élémentaires de fonctionnement ne sont pas suffisamment assimilées (Courillon, 2000).

La mobilisation des ressources financières ou des subventions internationales n'est pas toujours facile. Le plus souvent, les coûts élevés d'installation et de production combinés à la faible demande ne rentabilisent pas l'offre d'énergie électrique. Les projets d'électrification nécessitent une subvention partielle ou totale des équipements électriques. Seuls sont à la charge des populations les coûts d'entretien voire, dans le meilleur des cas, le renouvellement du petit matériel. Pour ces cas, des arrangements sont envisageables pour assurer l'indépendance financière des projets : mise en place de petits groupes électrogènes diesel (Plate-forme PNUD de Dombella Mali) ou de petits systèmes photovoltaïques (Centre de communication et d'activités de Massala ADEME/EDF). L'électrification étant coûteuse pour les sociétés publiques d'électricité en place, plusieurs opérateurs étrangers privés développent alors des programmes en choisissant souvent de manière aléatoire les villages en raison des difficultés d'opérer dans des zones rurales où l'information, les fonds et les compétences techniques sont limités. Cela se traduit souvent par l'impossibilité de mise en œuvre d'une planification énergétique rurale à l'échelle nationale (Munasinghe, 1991).

Les coûts de transactions (principalement de maintenance des équipements) sont importants en raison de l'absence de politique d'encouragement de l'investissement étranger du pays d'accueil. Ainsi dans les pays d'Afrique de l'Ouest, il est frappant de découvrir la multiplicité d'acteurs ayant pour but le développement énergétique. Même si leurs objectifs convergent, force est de constater l'absence de coopération entre tous ces intervenants sur le terrain. Une solution énergétique innovante est initiée par des acteurs différents sans que ces derniers puissent capitaliser les expériences antérieures effectuées par d'autres partenaires. Chaque acteur verrouille l'information, si bien que

les bilans permettant de dresser l'état de la diffusion d'une technologie ne sont effectivement connus que par quelques personnes, qui se gardent bien de partager l'information disponible.

*L'insuffisante sensibilisation des populations* aux nouvelles technologies conduit à terme à une non-appropriation. C'est pourquoi favoriser les conditions d'un transfert de technologie réussi est un élément essentiel de la durabilité. En l'absence d'une coordination en matière d'investissement, certains choix technologiques peuvent conduire à des verrouillages (lock-in) concernant la non-appropriation par la société et la non-efficacité sur le long terme. Pour ces raisons, la phase de transfert technologique demeure une composante essentielle d'une stratégie industrielle d'une institution.<sup>3</sup>

A partir du moment où une installation dépend soit du soleil, soit du vent ou de l'exposition à une source de chaleur, *sa position revêt une importance capitale pour une utilisation rationnelle*. Ainsi, le dysfonctionnement d'un système photovoltaïque provient souvent d'une mauvaise installation : inclinaison et ou orientation inappropriées des panneaux, exposition plus grande aux intempéries ou risques de dommages matériels (Courrillon, 2000). Par ailleurs, les pannes fréquentes des systèmes sont souvent dues à des réglages imprécis (mauvais serrage des connexions...) ou, plus fréquemment, résultent d'une utilisation inadaptée. Un dimensionnement inadapté des équipements peut inciter par exemple à des branchements pirates de batterie et entraîne un déséquilibre du système d'alimentation et donc un vieillissement prématuré de l'ensemble de l'équipement.

*Un transfert technologique inadapté peut résulter d'une négligence conduisant à une détérioration du matériel*. Ainsi, la gratuité de la ressource solaire associée, l'assimilation insuffisante des règles fondamentales de fonctionnement des systèmes photovoltaïques conduisent à une détérioration du matériel du fait de l'absence d'entretien à trois niveaux (Ademe, 2000)<sup>4</sup> :

- Niveau 0 : niveau d'entretien par les villageois ou les utilisateurs comme par exemple l'ajout d'eau distillée dans les batteries, le nettoyage des panneaux à l'aide d'un chiffon pour retirer les poussières...
- Niveau 1 : niveau d'entretien par le responsable technique du projet (remplacement de régulateurs, de la batterie...)
- Niveau 2 : niveau d'intervention d'un technicien régional en cas de pannes plus importantes.

---

<sup>3</sup> Nous entendons par institution une organisation comme une firme, une organisation non gouvernementale, un bailleur de fonds...

<sup>4</sup> Ademe, 2000, Pérennisation de l'EDR : la maintenance, Silène France.

Le mauvais entretien à ces différents niveaux peut résulter du fait d'un nonaccès aux équipements. Au Burkina Faso, pour extraire une station de pompage en vue de la réparer, il a fallu démonter le toit du local.

Le problème d'entretien régulier des installations électriques n'est pas spécifique aux applications basées sur des sources d'énergies renouvelables. On retrouve la même nécessité d'entretien pour les groupes diesels. Mais pour les technologies mécaniques diesel, les modes de fonctionnement et d'entretien sont plus facilement assimilés du fait de la large diffusion de moteurs diesel régis par les mêmes règles de fonctionnement. La CEES (Cellule d'Entretien des Equipements Solaires de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'énergie du Mali) a effectué le suivi pendant un an de 39 pompes à partir de Bamako et de 66 pompes dans la zone Mali Aqua Viva, soit 105 pompes. Il en ressort qu'il faut compter au moins une intervention en moyenne par an et par pompe. Mais sur les 49 interventions, 30 sont non-spécifiques au photovoltaïque. La maintenance des systèmes électriques suppose l'existence d'un circuit de réparation rodé à tous les niveaux.

Le risque majeur de non-diffusion des technologies renouvelables apparaît lorsque certains équipements expérimentaux n'ayant pas fait l'objet de tests suffisants en laboratoire et sur site sont vendus à grande échelle à des ONGs ou d'autres bailleurs de fonds surtout en l'absence de l'implication du fabricant dans un projet de développement. Il est important que les tests soient effectués sérieusement en laboratoire, mais aussi sur le site d'implantation. Les retours d'expérience sont d'autant moins importants que les équipements électriques de sources renouvelables demeurent faiblement utilisés dans les principaux pays exportateurs. Les dépenses de recherche consacrées aux énergies renouvelables sont faibles même dans les pays développés. Pour 23 pays industrialisés, les dépenses publiques consacrées à l'énergie sont passées de 12.5 milliards de dollars en 1985 à 7.5 milliards de dollars en 1999 (AIE, 2001). 95% des efforts de recherche et développement sont réalisés par neuf pays de l'OCDE (McDade et Johansson, 2001). Or, ces efforts ne privilégient pas les conditions de transfert de ces technologies aux pays du Sud. Beek et Benner (1998) ont relevé les principales motivations dans le développement des énergies renouvelables en prenant 16 pays : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, les Etats-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, la Norvège, les Pays Bas et le Portugal. Les résultats de leur étude montrent que le développement des énergies renouvelables est motivé en premier lieu par la réduction des émissions polluantes et le développement industriel, puis par l'indépendance énergétique, la création d'emplois, la réduction des coûts, le développement durable et enfin l'avancée technologique.

Les programmes d'électrification rurale peuvent être initiés par différents acteurs : l'Etat, les ONGs, l'aide internationale et les

entreprises. Chaque type d'acteur adopte une approche particulière de l'électrification rurale décentralisée.

### Stratégie d'implantation dans les pays du sud

Il convient de faire la distinction entre l'entité offrant le service énergétique et celle propriétaire des moyens des infrastructures. Si l'on prend comme critère de distinction, la propriété des infrastructures, nous pouvons envisager quatre cas possibles :

Le service électrique est assuré par une entreprise publique : c'est la forme de propriété la plus courante, où l'Etat doit rendre compte de sa gestion dans le cadre de contrats-plan ou de contrats-gestion.

L'Etat est propriétaire, mais l'exploitation est sous-traitée au secteur privé : ce dernier est souvent chargé de l'entretien et de l'exploitation de l'équipement, voire dans certains cas de la construction de l'infrastructure (gestion déléguée de type concession).

Le service privé est propriétaire des infrastructures mais son activité est réglementée.

Le service est assuré par la communauté et l'utilisateur qui sont propriétaires ou pas des équipements. Cette solution est privilégiée lorsque les services publics ne permettent pas la satisfaction de tels besoins.

Bien sûr, ces quatre situations ne sont pas exhaustives mais permettent de dresser les cas les plus courants. La capacité de mobiliser des financements adéquats pour le développement de services apparaît à chaque fois indispensable.

### Place de l'Etat

Plus que jamais, la nature du développement de l'électrification rurale décentralisée dans les pays du Sud n'a que très peu de chose à voir avec celle des pays développés. Dans ces derniers, l'Etat a particulièrement œuvré pour assurer la cohérence des schémas d'électrification, leur programmation, et surtout leur concrétisation en renforçant la législation et la réglementation. L'Etat a intégré la dimension économique par la mobilisation des forces économiques, sociales et administratives de la nation pour résoudre les problèmes qui se posaient. Cela s'est traduit dans certains pays (cas de la France) par l'émergence de concepts innovants tels que la péréquation tarifaire ayant favorisé la réalisation simultanée de l'électrification des villes et des campagnes, à une époque où les ruraux ne pouvaient pas financer à eux seuls leur électrification.

En France, L'époque qui a précédé la nationalisation de l'entreprise actuelle EDF (Electricité de France), a été marquée par deux grands débats : 1) le problème de l'électrification rurale du fait du coût élevé d'installation des lignes électriques ; 2) et la question de l'équipement hydroélectrique dans des cours d'eau loin des zones de consommation. Ce sont ces circonstances qui ont conduit à la nationalisation de l'électricité après un vote à l'unanimité par la chambre des députés en 1946 (Stoffaès, 1996).

L'électrification rurale française qui a été entièrement achevée au début des années 1960, a été permise grâce à la création dès 1936, du Fonds d'Amortissement des Charges d'Electricité (FACE). Le FACE applique sur les recettes basse tension des distributeurs d'électricité, un taux cinq fois plus élevé en zone urbaine (1,95% en 1993) qu'en zone rurale (0,39% en 1993). Le FACE au cours des années s'est vu octroyer d'autres responsabilités comme le renforcement de la qualité des réseaux, l'amélioration de la capacité de transit énergétique, de leur fiabilité et de leur esthétique et plus récemment, en 1994, un programme spécial énergies renouvelables et maîtrise de l'énergie a été créé (Donizeau, 2001).<sup>5</sup>

A un moment où les réserves, que ce soit en pétrole, gaz ou charbon s'avéraient importantes, la solution réseau pour l'ERD s'imposa dans les pays développés. Pendant longtemps, la légitimité de l'intervention de l'Etat pour l'offre d'un service énergétique était fondée en économie sur la théorie des rendements croissants et celle des économies externes inspirée des travaux de Marshall puis de Scitovsky (1954). Jusque dans les années 1950, dans la plupart des pays industrialisés, l'état gérait les dépenses publiques, considérées comme le moteur du développement. Pour mettre fin au « cercle vicieux de la pauvreté », Ragnar Nurkse (1952), préconise l'investissement par l'Etat pour permettre soit l'accumulation du capital (Rosenstein-Rodan, 1943) soit en assurant le passage du secteur agricole au secteur industriel (Lewis, 1954) ou encore pour permettre le décollage économique (Rostow, 1956). Ces théories ont été appliquées dans plusieurs pays en constituant des « réserves nécessaires à la stabilisation »<sup>6</sup>, que ce soit en Algérie avec l'essor des *industries industrialisantes* ou en Amérique Latine avec les thèses prônant la substitution des productions nationales aux importations, pour ne citer que ces exemples. L'Etat intervient pour réguler le prix des matières premières, en particulier celles destinées à l'exportation. Il se rémunère en prélevant des droits notamment sur les exportations. Mais, à partir des années 1980, les chocs pétroliers accélèrent l'endettement croissant de l'Etat. La spécificité de la demande et le fort endettement de l'Etat font que ce dernier ne peut assurer le financement d'infrastructures de base : la plupart des monopoles d'électricité sont déficitaires et des coupures fréquentes d'électricité se multiplient dans les centres urbains. L'électrification rurale ne peut être assurée, privant ainsi la majeure partie de la population de l'accès à l'électricité. Dans un

<sup>5</sup> Pour plus de détails sur le développement des énergies renouvelables en site non raccordé au réseau en France, voir l'article de Donizeau C, 2001, « les fonds d'amortissement des charges d'électrification (FACE) pour un développement des énergies renouvelables en site non raccordé au réseau sur le territoire français », *Electrification rurale décentralisée, dispositifs contractuels et financiers*, IEPF, ADEME.

<sup>6</sup> Pour plus de détails sur l'exemple fourni par la caisse de Stabilisation de la Côte d'Ivoire, voir Mahieu F.R (1990, p. 93) in *Les fondements de la crise économique en Afrique*, l'Harmattan.

contexte international de crise, la rupture de la croissance économique dans les pays industrialisés a réduit les débouchés à l'exportation des pays en développement et a renforcé leurs difficultés à rembourser leur dette. L'Etat qui était intervenu pour financer les infrastructures de développement, caractérisées par une rentabilité à long terme, se retrouve en cessation de paiement. Parallèlement, la montée en puissance des pays de l'Est asiatique renforce l'idée de la non-intervention de l'Etat pour permettre le libre jeu des mécanismes de marché. A partir de ce moment-là, on assistera à un retour en force des thèses libérales dans les théories du développement (Gore, 2000), favorisées aussi par les rapports critiques des grandes institutions internationales basées à Washington, la Banque mondiale, et le Fonds Monétaire International (FMI). La convergence internationale des stratégies de développement promues par le corps commun de la sagesse de « tous les économistes sérieux » est ce que Williamson appelle le « consensus de Washington » (Williamson, 1993, p. 1334). Le consensus de Washington se distingue par une intervention minimale de l'Etat pour contrer les mécanismes de « free rider » (Buchanan, 1968) qui rendent inefficace la régulation par le marché. Le *consensus de Washington* de Williamson repose sur 10 propositions (Singer et al, 2001, p 52) :

Une discipline fiscale qui permet de dégager un surplus budgétaire mesuré en pourcentage du PIB d'un pays ;

- Une priorité aux dépenses publiques à haut retour économique comme la santé ou l'éducation. En réalité, ces secteurs sont affectés par la discipline fiscale imposée pour le remboursement de la dette. Des études effectuées par l'UNICEF montrent que *l'ajustement avec un visage humain* se fait au détriment des groupes les plus vulnérables (Cornia et al., 1987)<sup>7</sup> ;
- Une réforme des impôts avec une réduction du taux marginal des taxes ;
- Une libéralisation financière ;
- Des taux d'échange unifiés et compétitifs ;
- Une libéralisation du commerce par la suppression des quotas et la réduction des tarifs à court terme ;
- La suppression des barrières d'entrée : des avantages égaux aussi bien pour un investissement direct étranger que pour un investissement domestique ;
- La privatisation ;
- La dérégulation dans le but d'atteindre des objectifs sociaux de développement ;
- Des droits de propriété garantis.

Gore (2000) analyse le passage d'une économie dominée par le leadership de l'Etat, à une économie de marché, en assimilant le

<sup>7</sup> Option citée par Singer et al. (2001) : Cornia G.A, Jolly R. et Steward (eds), 1987, *Adjustment with a human face*, 2 vols, Oxford and New-York : Oxford UP.

« consensus de Washington » à un paradigme<sup>8</sup>. Pour cela, il distingue deux grandes périodes dans les politiques de développement : la période 1950-1990 et après 1990. Les experts partisans du consensus de Washington essayent une conciliation du LIEO (Liberal International Economic Order) avec le développement durable. Le rapport de la Banque Mondiale sur le développement (1990) humanise « le consensus de Washington » en introduisant l'approche du « friendly market ». Cette tendance de rapprochement du marché au développement a conduit à des résultats éloignés des recommandations du consensus de Washington. Si bien que la Banque Mondiale finit par reconnaître que « les politiques inscrites dans le consensus de Washington ne sont ni la cause d'une hausse de croissance, ni la cause des crises » (World Bank, 1999, p. 2)<sup>9</sup>. Pour Gore (2000), les crises financières mexicaines et asiatiques au milieu des années 1990, expliqueraient un changement de tendance dans les pratiques et les orientations du développement. Après la crise financière mexicaine de 1994, Krugman considère le caractère dépassé du consensus de Washington : les politiques promues par les grandes institutions internationales ont permis l'attraction de capitaux privés, qui ont à leur tour favorisé les réformes économiques. Face à la multiplication des crises financières dans les années 1990, les économistes dominants envisagent la nécessité « d'un post-consensus de Washington » (Stiglitz, 1998) et s'accordent sur le fait que le changement ne doit pas provenir de l'extérieur, mais de la participation et du consensus (Gore, 2000). A la lumière de ces enseignements généraux sur l'évolution du rôle de l'Etat, on comprend pourquoi les taux d'électrification rurale ont faiblement progressé. L'électrification rurale n'est pas un domaine rentable où les mécanismes de marché peuvent jouer pleinement sans régulation. Les coûts d'électrification sont trop élevés et l'aide internationale ne peut se substituer aux efforts des gouvernements pour atteindre ces populations.

#### Les ONGs

Avec l'accroissement de la défaillance de l'Etat dans des domaines dont il avait traditionnellement la responsabilité, les ONGs se sont spécialisées dans leur soutien aux « petits projets énergétiques participatifs », se démarquant ainsi de l'approche technicienne et productiviste des grands projets de coopération publique. « Le petit projet » est conçu comme un outil de promotion de solutions énergétiques décentralisées, outil initié par les acteurs de base (*bottom up decisionmaking*). Cette logique d'action a fondé la légitimité d'intervention des ONGs dans un environnement concurrentiel de la coopération au développement. Elle a permis de créer une autre voie de développement, résumée sous l'expression « associationnisme » (Rouillé d'Orfeuil, 1984). Les projets d'électrification concernent

<sup>8</sup> Gore (2000) définit le paradigme comme l'ensemble des croyances, des valeurs et des techniques que des membres d'une même communauté partagent.

<sup>9</sup> Notre traduction.

généralement une échelle villageoise mais peuvent être étendus à un niveau régional, voire national.

A partir d'une évaluation de huit projets sur la base de documents fournis par les Ongs, Piveteau et Billaud (1999), soulignent que les analyses socio-économiques conduites avant l'électrification effective des populations rurales restent « rudimentaires ou ne sont pas articulées par la suite au suivi » (Billaud et Piveteau, 1999, p16). Les analyses menées comportent un volet technique important, pour l'identification de la solution décentralisée d'électrification.

*L'ONG intervient là où l'état ne veut pas s'engager.* L'électrification rurale du premier village électrifié par un groupe électrogène Imgoun, en 1989 par Migration et Développement au Maroc (M&D) n'est pas située dans une zone prioritaire pour l'ONE (Office Nationale de l'Electricité)<sup>10</sup>. En effet, Imgoun est dans la province de Taroudannt, plus grande province du Maroc et montagneuse à 60% : ce qui rend l'accès particulièrement difficile. De même l'électrification par CODEV Viet Phap en 1995, de deux villages par systèmes photovoltaïques se réalise dans le Delta du Mékong du Vietnam, non inclus dans la planification, du fait du caractère marécageux du territoire. L'ONG vient combler la défaillance de l'état en matière d'électrification par des réalisations plus ou moins durables.

Pour l'ONG, *l'électrification n'est pas une fin en soi mais un moyen d'atteindre un objectif ou plusieurs objectifs de développement* vaguement définis : améliorer les conditions des ménages, diminuer l'exode rural etc. Le nombre de projets réalisés en matière d'électrification rurale par Migration et Développement est important mais les réalisations de M&D ne se limitent pas à ce champ. Souvent un projet d'électrification vient après ou avant un projet de construction de route, d'adduction d'eau potable ou de formation. Il est à chaque fois l'expression des besoins d'une population locale qui s'appuie sur les actions de l'ONG pour constituer une dynamique communautaire locale. Dans l'offre d'électrification décentralisée que M&D propose aux populations, on retrouve plusieurs éléments d'une démarche participative articulée autour de six éléments : 1) la participation des villageois au soutien des émigrés ; 2) la péréquation locale par le soutien des familles les plus riches accordé aux familles les plus démunies : en témoigne les taux d'électrification des villages à 100% ; 3) la formation des jeunes du village pour assurer l'électrification de leur village ; 4) la maîtrise de l'énergie en utilisant des lampes basse consommation ; 5) l'adoption d'une solution technique adaptée par un dimensionnement spécifique au village ; 6) la responsabilisation des usagers par la création d'une association des usagers, entité qui assure la gestion du service électrique. Les surplus dégagés par un projet d'électrification sont utilisés pour la réalisation d'un autre projet d'électrification. C'est en ce sens que l'électrification rurale permet de rentrer dans un cercle vertueux de développement.

<sup>10</sup> ONE est la principale compagnie électrique au Maroc et constitue un monopole d'Etat.

Cependant, une étude approfondie de l'offre énergétique révèle que l'offre conditionne la demande. La plupart du temps, il est proposé des services énergétiques permettant des usages limités car l'offre est définie à partir d'une puissance minimale. L'absence de compteur individuel pour chaque ménage conduit à définir des services énergétiques forfaitaires autorisant de faibles usages énergétiques. Ces derniers se réduisent souvent à l'éclairage et à l'alimentation d'une télévision. Les populations prennent de mauvaises habitudes. Suite à notre enquête auprès d'une cinquantaine de femmes à Tambacara (région de Kayes, Mali) en avril 2001, le paiement forfaitaire n'incite pas à éteindre la lumière, lorsque la pièce n'est pas occupée. Il semblerait que les lumières restent allumées jusqu'à l'arrêt de la centrale. La justification de ce comportement tient à leur frénésie de consommation et leur satisfaction de profiter d'un service énergétique qui ne leur coûtera pas plus cher<sup>11</sup>. Une offre d'un service énergétique forfaitaire ne s'inscrit donc pas dans une approche de maîtrise de l'énergie pourtant indispensable pour la satisfaction du plus grand nombre.

Certes la demande en éclairage pour des usages domestiques est importante mais, il ne faudrait pas négliger le besoin exprimé pour des usages productifs. L'électrification par groupe électrogène exclut de fait la satisfaction de cette dernière catégorie d'usage, puisque le groupe ne fonctionne que quelques heures par nuit. Le fonctionnement du groupe toute la journée nécessiterait un consensus au sein du village et un surcoût que tout usager n'est pas toujours en mesure de supporter. Le dimensionnement des systèmes pour la satisfaction de l'éclairage en priorité limite les capacités d'adaptation du service énergétique à d'autres types de besoins (en particulier les besoins productifs), puisque l'usager ne bénéficie de l'électricité qu'un nombre limité d'heures et généralement la nuit.

*Une relation partenariale s'effectue en général entre l'ONG et la population locale, qui bénéficie du projet.* L'ONG peut bénéficier d'un soutien de proximité (aide étrangère provenant d'organisme de coopération...); mais, la pérennité du projet est assurée par la substitution des acteurs locaux à des acteurs internationaux. En l'absence d'appropriation du projet par la population locale, les installations, non entretenues, ne sont plus fonctionnelles. La durabilité du projet est dans ce cas compromise.

*Enfin, l'action d'une ONG peut être une action de médiation et de coordination* entre les bailleurs de fonds, une ou plusieurs entreprises, l'Etat (à travers les autorités communales, provinciales) et la populations locale.

#### *Stratégie d'indépendance technique*

Dans une stratégie de type « indépendance technique », le transfert se réalise dans le cadre de l'aide au développement. Elle s'inscrit dans une optique de décentralisation, avec une

<sup>11</sup> Pour plus de détails, voir Bentaleb N., (2001).



implication forte des villageois dans la gestion directe du programme d'électrification. Partant du constat que les projets entièrement subventionnés ne sont pas durables, le PNUD (Programme des Nations-Unies pour le Développement), a lancé au début des années 1990 le programme de plates-formes multifonctionnelles avec pour objectif la lutte contre la pauvreté des femmes (figure 2). L'appropriation du projet implique la participation des associations villageoises (environ 50 %). Une plate-forme comprend un moteur, un moulin de céréales, un broyeur de karité, un alternateur, un poste à soudure. La plate-forme permet aussi l'éclairage du village et parfois même l'alimentation d'une pompe hydraulique. Le PNUD favorise le transfert technologique et veille à assurer la formation du personnel des électriciens. La gestion courante de la plate-forme est assurée par l'association de femmes. *Le comité des électriciens* assure le suivi technique du réseau électrique et veille au recouvrement des redevances des abonnés. Les fonds qu'il récolte après déduction des charges de fonctionnement (dépenses en carburant et salaire de l'électricien essentiellement) sont reversés au comité de gestion féminin, qui se charge à son tour de faire transiter ces fonds à l'association des femmes (propriétaire des équipements). Par ce type de gestion, le comité des électriciens rend compte au comité du village de l'importance des revenus versés à l'association de femmes et permet ainsi d'assurer le contrôle par les hommes des revenus perçus par les femmes. *La cellule d'appui conseil* est chargée de veiller au bon fonctionnement de la plate-forme et intervient en cas de panne de la plate-forme. Elle forme le personnel, mobilise les crédits locaux auprès des associations villageoises. Les différentes cellules de conseil sont coordonnées par une super-structure : *le directeur national* qui est responsable des fonds procurés par le gouvernement du pays d'accueil grâce aux dons du PNUD (le bailleur de fonds).

Ce type de gestion favorise la participation des populations locales par une appropriation totale du projet. Ainsi, l'autonomie est assurée non seulement d'un point de vue technique par le transfert d'un savoir-faire mais aussi financier. Cependant, l'obligation de gestion de la plate-forme par les femmes, qui est imposée par le PNUD, s'est traduite par la constitution d'un circuit de gestion parallèle masculin et composé des notables du village. Cela réduit d'autant les marges de liberté des femmes qui se sentent obligées de se soumettre aux avis émis. Comme, de plus, les bénéfices générés permettent au mieux de couvrir les charges d'exploitation, le surplus sert davantage à fournir des privilèges aux notables du village qu'à servir de base à l'accumulation de capital pour les femmes. Le transfert de technologie favorisé par le concept de plate-forme n'est pas sans poser quelques dysfonctionnements : bien que les recettes soient distribuées à l'association de femmes, certaines femmes délaissent les moulins de la plate-forme et préfèrent se rendre aux moulins privés. La plate-forme PNUD a ainsi permis l'émergence de deux moulins qui concurrencent son activité. Il s'agit de l'imitation de la prestation d'un service qui se construit autour de la possession d'un bien importé de l'extérieur. Cela s'explique par différentes raisons :

En premier lieu, la faible technicité de cet équipement a permis assez rapidement la formation d'un capital humain permettant au moins l'entretien du matériel nécessaire à son fonctionnement quotidien. De plus, la formation par le PNUD d'électriciens issus du village permet aux meuniers privés de recourir aux conseils et savoir-faire du personnel de la plate-forme lorsque cela est nécessaire. Les résistances de transferts de savoir-faire sont d'autant moins fortes que la demande provient de personnes appartenant au conseil du village et hautement respectées en raison de leur rang social dans le village (situation des propriétaires de moulins à Dembella).

En second lieu, le capital nécessaire pour l'acquisition du groupe électrogène pour alimenter un moulin (karité et grains) et/ou une décortiqueuse est vite rentabilisé, car il existe une demande locale régulière surtout dans des villages de taille importante. La mouture du grain, qui se fait chaque jour en raison de la détérioration rapide de la qualité gustative des céréales, peut libérer du temps pour effectuer d'autres activités rémunératrices. De plus, la structure éclatée du village (cas de Dembella qui s'étend sur trois kilomètres) autorise la multiplication des moulins pour satisfaire plusieurs concentrations de la demande. Tout un nouveau quartier s'est développé, situé en marge du centre du village, qui correspond à la volonté du maire d'étendre sa commune loin du centre. Les femmes apportent leurs grains à moudre après leur retour de la brousse (travail au champ privé, récolte de noix de Karité et collecte du bois pour cuisson...). Bien qu'elles soient fatiguées (elles travaillent en moyenne cinq heures avant chaque repas) et pressées, car la cuisson du repas prend du temps, elles vont au moulin pour libérer du temps afin d'exercer une autre activité génératrice de revenu.

Troisièmement, les arrangements proposés par les moulins privés tels que les possibilités de crédits, la flexibilité des horaires d'ouverture ou la possibilité de moudre de petites quantités de grains font qu'ils concurrencent la plate-forme PNUD où travaillent des salariés, avec des horaires de travail plus rigides. L'ouvrier du moulin privé est sur place toute la journée et même une partie de la nuit et moud n'importe quelle quantité de grains.

Finalement, la volonté du PNUD de diminuer la vulnérabilité des femmes en favorisant conjointement un développement économique et humain se traduit surtout par une concentration sur le développement humain (éclairage et alimentation du centre de santé). La gestion institutionnelle du PNUD en affichant clairement que les bénéfices de la plate-forme seront attribués collectivement aux femmes, n'incitent pas les hommes à favoriser l'accumulation du capital de ces dernières. Face au respect des coutumes (non-concurrence des meuniers privés), la maximisation du profit n'est pas un critère prioritaire dans l'échelle de satisfaction des femmes. La résistance au changement est un acte pouvant être interprété comme une infraction aux règles anciennes ayant un fondement dans les croyances et qui peut entraîner une sanction (Lachaud, 1985).

La volonté affichée du PNUD de confier la gestion de la plateforme aux femmes, peut conduire à terme à réduire la pérennité de ce projet. Mais, les conditions de transferts technologiques sont assurées, car le savoir technique transmis aux électriciens par les formations du PNUD se diffuse de manière informelle, à l'occasion des maintenances que ces derniers assurent aux

moulins privés. Il apparaît que les conditions de transfert technologique sont conditionnées par la capacité d'assimilation et d'adaptation de la technologie transférée par celui qui reçoit (Schembri et Petit, 2002 ; Tispouri, 1999).

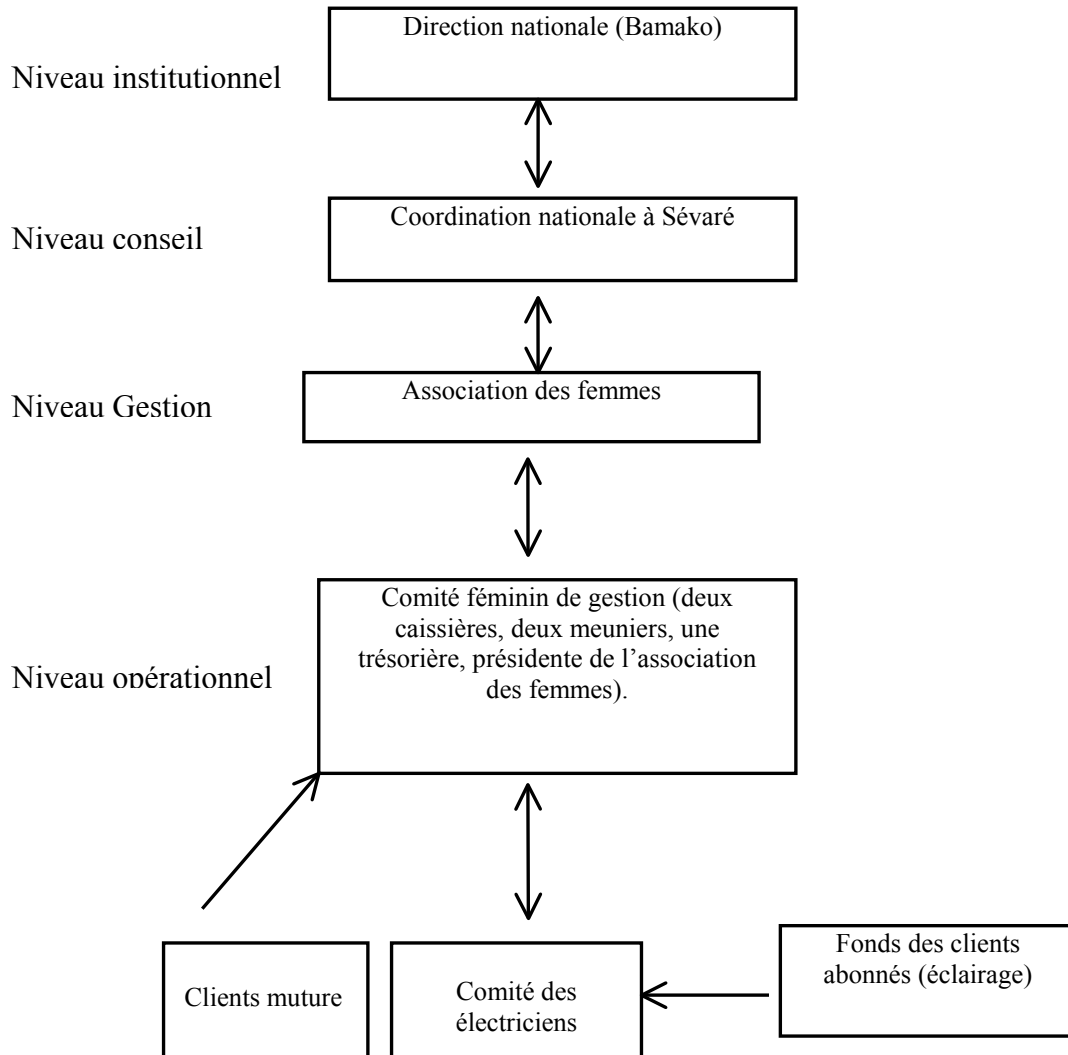


Figure 2. Schéma récapitulatif du mode de gestion de la plate-forme PNUD au Mali

### *Veille technologique*

Certains projets sont réalisés pour assurer une veille technologique et permettre d'avoir une expérience pilote dans un pays du Sud. Cela se réalise souvent par la délégation du transfert technologique à une société locale. C'est le cas du CCA (Centre de Communication et d'Activité). Ce concept est né en 1992 sur l'initiative d'EDF, de l'ADEME, de TOTAL et de FRANCE TELECOM pour doter certains villages ruraux du Sud, ayant de 2000 à 5000 habitants, d'un ensemble de services permettant la satisfaction de besoins primaires minimums. Ce groupement a expérimenté le CCA dans trois pays sahéliens : le Burkina Faso, le Mali et le Bénin. Les villages ayant accueilli des CCA ont bénéficié également de programmes de pompage d'eau potable (les deux premiers pays au sein du CILLS-programme régional de pompage solaire (PRS) et le Bénin par l'Agence Française de Développement).

Le CCA est un centre multi-service offrant : 1) des services marchands (téléphonie, séance de TV-magnétoscope, location de kits photovoltaïques pour : éclairage, lampes solaires portatives, boîtes d'énergie, recharge de batteries, rafraîchissement de boissons) ; 2) des services non marchands d'intérêt général dans des locaux communautaires (dispensaire, école..) et éclairage public des rues principales du village (Courillon et Blary, 2001). L'offre énergétique dépend du gisement local d'énergie : solaire, éolien, hydraulique, biomasse, gaz, gasoil... La gestion de ce centre est assurée par une société privée locale ou par une ONG.

La gestion de type privé par une société locale s'effectue par l'intégration de services de différente nature. La délégation de gestion à une société privée (cas des CCA du Bénin) permet de pallier l'absence d'infrastructure (télécommunication, adduction d'eau potable et électricité) et la défaillance de l'Etat. Elle se traduit par de meilleurs résultats en matière de participation des populations locales. Elle ne diminue pas pour autant la dépendance des populations locales qui, en dehors des subventions, n'auraient pas pu bénéficier de l'accès à ces technologies. Dans le cas des CCA du Mali, un contrat de maintenance est passé avec une société locale. La viabilité de ce type de gestion est tributaire des financements extérieurs. En l'absence de contrats incitatifs, la société exploitante n'est pas incitée à veiller à la rentabilité économique du centre. Les pertes cumulées du fait du non-recouvrement des redevances des usagers, ne permettent plus d'assurer la rémunération de la société chargée de l'exploitation. Le groupement envisage alors les possibilités de se dessaisir du centre. La société non rémunérée par le groupement ne réalise plus l'entretien nécessaire et les installations sont vite non-opérationnelles.

Au Burkina Faso, la gestion communautaire avec le soutien d'ONGs présentes dans les villages a été expérimentée à Gomboro, Boken et Bougnounou. Ce type de gestion n'a pas permis de dégager un recouvrement même partiel des redevances auprès des usagers. La relation partenariale entre les ONGs et les villageois était, avant l'installation des CCA, une relation inscrite

dans une approche humanitaire de don. Les ONGs n'ont pas réussi à mobiliser une contribution financière des usagers, contribution nécessaire pour la maintenance des équipements. L'absence d'une approche clairement identifiée a augmenté la confusion des usagers qui n'ont plus assuré le recouvrement de leur redevance. Cela a été interprété par le groupement comme une absence d'implication de la population locale : la pérennité du projet a été menacée et les centres arrêtés.

Pour pallier aux dysfonctionnements liés à leur présence insuffisante sur le terrain, certains énergéticiens essayent des concepts innovants. Il s'agit notamment de la création d'une société de droit local (cas des Sociétés de Service Décentralisées).

### **Stratégie d'expansion internationale**

Lorsque le marché est important et permet d'assurer une expansion internationale, certains opérateurs s'implantent dans le pays. C'est le cas, par exemple, d'EDF qui, au moyen de la société de services décentralisés (SSD), s'inscrit dans un cadre stratégique de déploiement du groupe EDF. En raison de l'ouverture des marchés en Europe, cette société prévoit que, à l'horizon 2005, 50% de son chiffre d'affaires sera réalisé hors du marché français de l'électricité. La société de services décentralisée est une société de droit local appartenant à l'EDF, en charge d'assurer le développement de services énergétiques. Ce concept a été initié par le programme ACCES (ACCESion à l'Energie et aux Services) lancé en 2001. L'ambition du programme ACCES est de permettre à l'horizon 2003 l'accès à l'électricité à plus de 300000 personnes réparties dans plusieurs pays : le Maroc (80000), le Mali (75000), Madagascar (120000), le Brésil (70000) et l'Afrique du Sud (90000). La société de services décentralisée s'inscrit dans la tradition de service public et s'engage à assurer la continuité du service, la qualité, la sécurité des biens et des personnes, la protection de l'environnement. Les installations électriques sont soit la propriété de l'Etat soit celle de la SSD qui facture les services à un prix qu'elle a librement fixé. Cette société est financée soit par des investisseurs qui acceptent un placement risqué à un taux de rentabilité inférieur à la moyenne, des bailleurs de fonds qui subventionnent le projet. L'Etat peut faciliter l'installation d'un énergéticien en accordant certaines exonérations fiscales et douanières.

La SSD Mali-Région de Kayes est la première SSD opérationnelle. Les abonnements mensuels sont payables au début de chaque mois pour le mois à venir et en cas de retard de paiement, le garant et l'association d'immigrés sont chargés de trouver une solution. Au bout de 60 jours, si aucune solution n'est trouvée les installations sont démontées. Dans cette même région, l'absence de paiement localement a conduit à envisager la possibilité de paiement directement en France par les membres de la famille en France. Les habitants de la région de Kayes vivent essentiellement des transferts d'argent. Pour l'exploitation locale, la SSD recrute du personnel localement : elle lui assure

une formation technique et de gestion pour qu'il puisse réaliser la gestion aussi bien technique que les recouvrements des factures. Ce type de stratégie suppose le partenariat avec des structures locales. La coopération d'un expert ou d'un technicien du Nord dans un Pays du Sud exige une adaptation à la culture locale tant de la part de l'institution en charge de mettre en place le projet, que des populations rurales bénéficiaires. Cette adaptation se situe à deux niveaux:

- au niveau du travail: partenariat avec des hommes du sud, appartenant à une structure institutionnelle propre et ayant un mode de fonctionnement spécifique,
- au niveau de l'adéquation des solutions énergétiques aux besoins des populations rurales.

Il y a donc nécessité d'une double adaptation : à la culture d'entreprise ou de l'institution avec laquelle s'opère la coopération, mais aussi avec la culture nationale. De ce fait, la viabilité d'un investissement énergétique ne peut s'inscrire que dans le temps. La création d'une entité autonome, la SSD dans le pays d'accueil, confère aux projets un horizon à long terme. La pérennité du projet d'électrification devient alors entièrement dépendante de la capacité de survie voire d'expansion de la SSD.

## Conclusion

Les capitaux élevés et l'importance des coûts d'exploitation combinés à de faibles revenus font que les programmes d'électrification pour être viables doivent être lourdement subventionnés (David, 1995). La mobilisation de moyens financiers pour la réalisation de projets en énergies renouvelables devrait être favorisée par l'intégration des préoccupations environnementales dans les stratégies des institutions. Mais les instruments demeurent encore à l'heure actuelle en gestation : les mécanismes de développement propre n'ont pas encore permis l'émergence d'un consensus. Lorsqu'il existe des supports institutionnels et techniques, le moyen d'accélérer la diffusion d'énergie est l'accès à un crédit adéquat. En l'absence d'économies d'échelle suffisantes et de programmes de sensibilisation pour l'utilisation de ces technologies, leur diffusion continuera à s'effectuer à un faible rythme. Une chose est sûre cependant : même si l'utilisation des énergies renouvelables tarde à se généraliser, l'électricité revêt une valeur hautement symbolique permettant l'accès au monde moderne (Foley 1989).

## Bibliographie

Barnes D. et Qian L., 1992, «Urban Interfuel Substitution, Energy Use and Equity in developing countries : Some Preliminary Results », in Dorian J.P et Fesharaki F. (Eds), International Issues in Energy Policy, *Development, and Economics*, Westview Press.

Bentaleb N., 2001, *Evaluation de la plate-forme multifonctionnelle EDF dans la région de Kayes (Mali)*, Rapport de mission au Mali pour le compte d'EDF en mars-avril 2001.

Benallou A. et Rodot M. (sous la Direction), 2002, *Photovoltaïque : l'électricité solaire au service du développement rural*, 2<sup>ème</sup> édition, Paris, Systèmes Solaires.

BIT, 1976, *Basic Needs*, Geneva, Novembre.

Courillon M. et Blary M-H., 2001, « le concept de centre de communication et d'activités (CCA) », *Electrification rurale décentralisée, dispositifs contractuels et financiers*, IEPF et ADEME (Eds).

Courillon M., 2000, L'électrification rurale décentralisée : des projets aux programmes, ADEME.

Davis M., 1995, Institutional frameworks for electricity supply to rural communities : a literature review, EDRC.

De Gouvello C., 1994, "Programmes expérimentaux d'électrification rurale photovoltaïque: cahier des charges pour surmonter la contrainte économique et spatiale caractéristique des zones paysannes", *Revue de l'énergie*, n°464, décembre, pp. 679-690

Donizeau C., 2001, « les fonds d'amortissement des charges d'électrification (FACE) pour un développement des énergies renouvelables en site non raccordé au réseau sur le territoire français », *Electrification rurale décentralisée, dispositifs contractuels et financiers*, IEPF et ADEME (Eds).

Foley G., 1989, *Electricity for rural people*, London, Panos.

Gibson D.V., Rogers E.M., 1994, R&D Collaboration and Trial : The Microelectronics and Computer Technology Corporation, Boston : Harvard Business School Press.

Gibson V.D., 1997, "Inter-organizational Technology Transfer: From Standard Technology Packages to Spin-Offs", *Commercialising high technology: East and west*, Rowman & Littlefield Published.

Gore C., 2000, « The rise and fall of the Washington consensus as a paradigm for developing countries », *World Development*, Vol. 28, n°5, 789-804 pp.

Lachaud J-M. et Penouil M., 1985, Le développement spontané les activités informelles en Afrique, Pedone.

Meignen L., 1996, Histoire de la révolution industrielle et du développement 1776-1914, 286 p.

Munasinghe M.P.C., 1991, « Electricity and the environment in developing countries with special reference to asia », in Ferrari and al (eds), *Energy and the environment in the 21 st century*, Cambridge, Mass : the MIT Press.

Muntasser M.A. et al., 2000, "Photovoltaic marketing in developing countries", *Applied energy*, 65, pp. 67-72.

O'Connor M, Gallopin G-C., Funtowicz S., Ravetz J., 2001, « La science pour le XXIe siècle : du contrat social aux fondements scientifiques », *Revue internationale des sciences sociales*, n°168, Juin.

Piveteau A. et Billaud F., 1999, Evaluation d'opérations d'électrification rurale décentralisée menées par des ONGs, analyse conduite sur la base de la documentation interne fournie par les ONGs, UMR Regards CNRS-IRD, Bordeaux.

Radosevic S., 1999, International technology transfer and catch up in economic development, Edward Elgar.

Rouillé d'Orfeuil H., 1984, Coopérer autrement. L'engagement des organisations non gouvernementales aujourd'hui, Paris, l'Harmattan.

Schembri P. et Petit O., 2001, Transferts de technologie, croissance et environnement : de quelques débats et controverses dans le contexte de la mondialisation économique, Journée d'Etude du C3ED « Regards critiques sur les enjeux de la mondialisation ».

Singer H.W et Raffér Kunibert, 2001, The economic north-south divide six decades of unequal development, Edward Elgar.

Stoffaes C., 1996, « Droit à l'énergie et service public: le passé et le devenir », in *Droit à l'énergie*, Emile Mallet et Michel Paty (Eds), Editions Passages, pp. 29-31.

Tsipouri L., 1999, Up-grading knowledge and diffusing technology in a regional context, Paris, OECD, DT/TDPC(99)8.

Williamson J., 1993, « Democracy and the 'WashingtonConsensus' », *World Development*, Vol. 21, n°8, 1329-1336 pp.

# ENERGIE : RÉENCHAÎNER PROMÉTHÉE ?

## Une approche conceptuelle

Fabrice Flipo, Ingénieur, philosophe, Site : <http://fabrice.flipo.free.fr>,  
Courriel : [fabrice.flipo@ifrance.com](mailto:fabrice.flipo@ifrance.com)

---

**Résumé :** La plupart des débats contemporains autour du développement technique font référence au mythe de Prométhée. Prométhée a volé le feu pour le donner aux hommes, et le feu, c'est l'énergie, le moyen de démultiplier le pouvoir des hommes sur leur milieu... et sur leur prochain. Le mythe, tel qu'il est rapporté par Platon, affirme en effet que le feu provoqua l'hubris et de grandes guerres chez les hommes. D'où la polarisation du débat contemporain sur la technique entre ceux qui veulent laisser Prométhée agir librement, de manière à ce que les Hommes disposent de pouvoirs aussi grands que possible pour agir sur la nature, et ceux qui voudraient plutôt "ré enchaîner" Prométhée, jugeant que son pouvoir est devenu trop grand. Ce que l'on connaît moins est la suite du mythe : le désordre conduisit Zeus à envoyer Hermès pour remettre Dikè, la justice, entre leurs mains, qui permit de ramener la paix.

Nous montrons que l'essentiel du mythe est dans cette seconde partie souvent oubliée, et non autour de la question de savoir s'il faut libérer ou enchaîner Prométhée. Cet article entend tirer parti des leçons de ce mythe pour analyser la géopolitique de l'énergie contemporaine. A la suite des analyses d'Ivan Illich, nous entendons montrer que la sobriété, ou juste mesure, par opposition à l'hubris, l'illimité, est l'une des conditions nécessaires de tout projet global ayant la paix pour objectif. Ce qui est mis en jeu avec le débat sur l'énergie n'est autre que la question de la répartition du pouvoir. Cela suppose de mettre en débat non seulement des questions de bien-être économique agrégé, mais aussi des questions de droit (droit au développement, droits des générations à venir etc.)

**Mots-clés :** énergie, philosophie, justice, équité, géopolitique, développement.

---

### Les leçons de Prométhée et d'Épiméthée

Les critiques de la techniques sous l'angle de la maîtrise se réfèrent souvent à une lecture de l'ancien mythe de Prométhée. Que nous apprend ce mythe (Platon)<sup>1</sup> ? Il dit qu'Épiméthée, littéralement "celui qui voit après", l'oublieux, a distribué tous les dons aux êtres et de ce fait n'avait plus rien à donner quand il arriva à l'être humain. Prométhée, "celui qui voit avant", le prévoyant, pour réparer l'oubli et pourvoir l'homme d'un don sans lequel il était destiné à disparaître rapidement, s'en alla dérober le feu et les arts à Athéna et à Héphaïstos. Pour ce larcin, il fut puni et enchaîné. Les interprétations habituelles laissent penser que cet enchaînement a permis de domestiquer les arts et le feu, et empêché Prométhée de doter les êtres humains d'un pouvoir excessif qu'ils n'auraient pas su maîtriser. Les analyses s'en tiennent souvent là, comme s'il y avait d'un côté les partisans du "ré enchaînement" de Prométhée (Ministère de la Recherche : 2003), c'est-à-dire rendre le feu à Héphaïstos, arrêter l'innovation technique et sa part de risque, et de l'autre ceux qui souhaiteraient au contraire que Prométhée continue de se déchaîner, comptant sur la main invisible ou sur le matérialisme de l'histoire pour harmoniser tout cela et déboucher sur une nouvelle époque d'abondance. Autrement dit, la discussion se focalise autour de l'innovation technique, afin de savoir si oui ou

non le pouvoir supplémentaire est bon. Sans surprise, c'est autour de ce même lieu que tournent la plupart des discussions sur le principe de précaution (Kourilsky et Viney : 1999).

C'est là à notre avis une vision tronquée du mythe. D'ailleurs, quand les confrontations autour du principe de précaution sont posées en ces termes-là, elles en général finissent en dialogue de sourds. Les techniques et l'action en général comportent toujours une partie de risque, le problème qui est spécifiquement posé ici n'est pas celui-là (Arendt, 1961). La fin du mythe, trop souvent oubliée, donne un autre sens au problème. En effet, il est dit que Zeus envoya Hermès pour apporter justice (la dikè) et respect (aidô), c'est-à-dire la faculté d'argumenter quant à ce qui est juste afin que les techniques y conspirent, et que le conflit, l'excès (hubris) soit contenu. La justice et le respect ne sont pas des techniques, mais une capacité à discerner, à débattre et à mettre en œuvre collectivement les fins ultimes auxquelles doivent concourir les techniques. La maîtrise de la technique est dès lors moins l'acquisition ou non d'un pouvoir supplémentaire que la question de savoir à qui profitent ces pouvoirs. Le mythe n'affirme donc pas que laisser Prométhée se déchaîner soit porter atteinte aux dieux ou à la nature. Il ne dit pas non plus qu'apaiser Prométhée conduit nécessairement au nivellement des valeurs, comme Nietzsche a peut-être pu le penser (Nietzsche, 1871). Il dit plutôt que l'hubris porte atteinte à la justice et au respect, c'est-à-dire à ce qui est dû à autrui. Il vient demander à qui profite

---

<sup>1</sup> Nous nous référerons ici à la version de Platon.

ce pouvoir, et s'il est légitime que cela profite aux personnes identifiées. Il n'y a là rien de surnaturel. On voit donc à quel point les anciens Grecs n'étaient pas dupes de la technique - c'est-à-dire du pouvoir.

Il y a trois leçons à retenir de ce mythe, à notre sens. La première est que l'être humain peut être si fasciné par le pouvoir immédiat des techniques qu'il en vient à oublier les conséquences de ses actions. Et cela n'a jamais été aussi vrai qu'aujourd'hui : nous parvenons à modifier la planète à des échelles sans précédent, mais nous ne maîtrisons pas les conséquences de l'usage de ce pouvoir. La collectivité humaine est certes devenue une force géologique (Vernadsky, 1929), mais c'est une force très largement aveugle. Cet aveuglement ne vient pas seulement du caractère incertain de l'action. L'hypothèse de changements climatiques consécutifs au dégagement massif de gaz à effet de serre, par exemple, était disponible depuis plus d'un siècle (Arrhénius, 1896). L'aveuglement vient aussi de ce que cette humanité, ou tout du moins une petite partie d'entre elle, ne s'intéresse qu'à certains aspects du monde. Le journal *Le Monde*, en France, par exemple, publie chaque année un "état du monde" qui est pour l'essentiel consacré à la santé de l'économie et aux innovations techniques produites par cette économie. Le monde n'est pourtant pas réductible à cela, loin de là ! Il manque l'état des sociétés peu industrialisées, les luttes pour les droits, l'état des écosystèmes et de la planète, le bilan des égalités et inégalités et un grand nombre d'autres aspects.

Les sociétés industrialisées se sont enivrées dans une course au pouvoir, mais non à la maîtrise. Ce n'est plus le critère d'amélioration des conditions de bien-être qui tire la plupart des innovations, et surtout les plus récentes, mais le désir d'arriver à faire ce que le voisin ne parvenait pas à faire, ou faire en sorte de lui prendre un territoire symbolique, tel que la "conquête" de l'espace. Le but est de paraître puissant et d'impressionner son adversaire. Les faiseurs de miracles arrivent à éblouir les foules et les dirigeants et leur faire oublier tout sens des réalités. Les OGM et la génétique sont un cas exemplaire. Alors que ces techniques sont plus proche du bricolage aléatoire que de la maîtrise, elles sont régulièrement vantées par des firmes ou des chercheurs pour d'inraisemblables mérites miraculeux, tels que l'éradication de la faim dans le monde ou la maîtrise de l'espèce humaine. De tels raccourcis, qui ne résistent pas une seconde à une analyse sérieuse, sont tout simplement stupéfiants. Ces discours sont pourtant utilisés sans restriction aucune dans l'espace public, sous le concept hautement significatif de "publicité" - autrement dit, de discours de référence pour le sens commun (Arendt, 1961). Le fait que le débat tourne autour de l'ampleur possible des miracles et non autour des enjeux de pouvoir sous-jacents prouve que cela marche, en grande partie. Les publicitaires et les récepteurs des publicités y croient tous les deux, ou en tout cas ils préfèrent y croire plutôt qu'y réfléchir sérieusement et se soucier d'apporter un peu de vérité, ou au moins de débat, dans l'espace public.

La seconde leçon à retenir est que le pouvoir n'est pas le pouvoir de tous au seul motif que les quelques-uns qui le détiennent affirment le mettre au service de tous, ou promettent de le faire dans un proche avenir. Ainsi, affirmer que l'homme pourrait un jour coloniser l'espace oublie de dire qu'en l'état actuel des lois élémentaires de la physique et des ressources naturelles, cela ne pourra jamais concerner qu'une extrême minorité de l'humanité, puisque nous ne sommes même pas certains qu'il y ait assez de place dans la biosphère pour que tout le monde ait ne serait-ce qu'une mobylette. Il y a aujourd'hui 750 véhicules motorisés pour 1000 habitants aux Etats-Unis, contre 8 en Chine et en Inde (WRI, 2003), et les tendances là aussi sont clairement incompatibles avec un développement durable (AIE, 2000). Il y a certains dangers à confier aveuglément de grands pouvoirs à quelques-uns, le fait est quand même bien connu. Il vaut dans le domaine technique comme ailleurs. Ce pouvoir peut être utilisé pour asservir autrui, actuel ou futur, humain ou non. La seule manière d'en assurer le contrôle est de mettre en place des structures de participation et de contre-pouvoir efficaces. Maîtriser le pouvoir, cela ne peut pas être autre chose que de le démocratiser, d'empêcher qu'il ne soit personnifié, incarné, confisqué par quelques-uns. L'absence de participation aux décisions collectives qui déterminent l'espace quotidien des personnes est très exactement ce qu'on appelle l'exclusion, qu'elle soit énergétique, numérique ou autre. L'exclusion génère de la division et de l'affrontement. Le problème à l'échelle du monde est encore plus évident : alors que toutes les négociations internationales font comme si la croissance économique et le développement étaient possibles pour l'ensemble de la planète, il est d'ores et déjà écologiquement impossible de généraliser ce qu'on entend habituellement par développement, à savoir le mode de vie des pays industrialisés, des pays "développés". Dire aux PED qu'ils ne consommeront jamais comme nous, c'est leur dire que les pays industrialisés les excluent de la mondialisation. Après 50 ans de promesses, c'est une injustice grave et lourde de conséquences géopolitiques.

La troisième leçon est que, contrairement à ce que Hans Jonas affirme (Jonas, 1979), ce n'est pas d'une seulement d'éthique dont la civilisation technologique a besoin mais d'une justice, parce qu'il ne s'agit pas d'un problème soluble à l'échelle personnelle. Une éthique s'adresse seulement au comportement individuel, alors qu'une justice suppose de considérer l'ordre social dans son entier. La justice demande que l'on respecte ce qui est dû à chacun, actuel ou à venir, au Nord ou au Sud. L'approche économique orthodoxe fait très largement l'impasse sur ces questions. Elle n'a pas de vision de l'avenir au-delà d'une décennie, sinon sous la forme d'une promesse d'abondance qu'elle ne se presse pas d'étayer, alors que pourtant les signes de rareté et de croissance des inégalités, y compris au sein des pays industrialisés, se multiplient. On ne s'est pas assez interrogé sur le sens du scénario dit « tendanciel » (GIEC, 2001), qui suppose que la croissance économique continue jusqu'à un avenir indéfini : comment cela est-il possible ? Quelles sont les conséquences réelles ? Qu'est-ce qui croît exactement ? Connaissant les multiples insuffisances de l'indicateur PNB, en

particulier sur le long terme, tenir la croissance comme quelque chose de toujours désirable pose question. Au point de vue écologique, pourtant, les choses sont claires. La croissance économique s'est jusqu'ici accompagnée d'une croissance de la pression écologique. Si certaines pressions se sont stabilisées ou ont légèrement décliné, c'était soit au profit des importations de biens naturels soit au profit de nouvelles pressions (Rees et Wackernagel, 1999 ; Bringezu et Schutz, 2001). Ce qu'il est convenu d'appeler le Nord géopolitique vit très largement sur l'usage de ressources et d'environnement qui auraient pu servir au Sud et aux générations à venir. Ces usages vont au-delà du droit d'usufruit, tel qu'il avait été reconnu par Locke par exemple : "la même loi de nature qui nous donne la propriété de cette manière [c'est-à-dire par le travail] lui impose des limites. Dieu a donné toutes choses en abondance. [...] Tout ce qu'un homme peut utiliser de manière à en retirer quelque avantage quelconque pour son existence sans gaspiller, voilà ce que son travail peut marquer du sceau de la propriété. Tout ce qui va au-delà excède sa part et appartient à d'autres" (Locke : 1690). Parmi ces "autres" on pourrait par exemple ranger les générations futures, voire les êtres vivants naturels non humains. Pour reprendre une expression célèbre, la consommation, au-delà d'un certain point, c'est du vol (Proudhon, 1840). Et ceci met en cause non seulement les comportements individuels, mais aussi le milieu moral et naturel des sociétés, les mœurs et les infrastructures matérielles (planification urbaine, transports etc.), pour autant que nos comportements ne sont pas entièrement libres mais directement prédéterminés par eux. En effet, il n'est pas facile de circuler à pied dans une banlieue éloignée, ni de résister à la pression consumériste induite par les sommes colossales dépensées en "publicité" (laquelle est évidemment comprise dans le prix du produit et le renchérit d'autant). Ainsi, en France, ce sont près de 50 milliards d'euros<sup>2</sup> qui sont ainsi investis en divers frais de communication n'ayant tous qu'un seul objectif : faire consommer. Les infrastructures morales et matérielles de la société de production-consommation nous conditionnent et font nos chaînes, étouffant toute réelle contestation qui soit autre chose qu'un ajustement marginal. La précaution, dans ce cas, ne peut s'entendre que comme la poursuite des mêmes buts, mais avec la mention de quelques "précautions" qui sont tôt ou tard ignorées car le maintien des mêmes buts conduit en définitive à continuer à célébrer les mêmes passions sociales, que le droit, à moins d'une grande force de répression, ne peut pas endiguer.

### La solution par la croissance

L'hybris, la démesure, la course sans fin au pouvoir, était un danger bien connu des Grecs. C'est pour cette raison qu'ils faisaient de l'arête, la juste mesure, l'équilibre, la vertu suprême du politique. Le système actuel est basé sur un raisonnement inverse : au lieu de faire de la juste mesure une question centrale, il postule qu'un supplément de pouvoir, un supplément d'appropriation, permettra d'éviter de poser le débat proprement

politique de la répartition du pouvoir. Nous assistons donc à une fuite en avant généralisée. Tant que le pouvoir moyen croît à court terme, tant que la croissance apporte davantage de richesses, alors tout le monde est content et peut espérer avoir encore davantage. Bien sûr, ceci n'est pas tout à fait exact : le pouvoir croît seulement en moyenne. Même au sein des pays "riches", les inégalités s'aggravent. Mais l'espoir dans la croissance reste de mise, même chez les exclus. Une association comme Attac, par exemple, ne remet toujours pas en cause la croissance, mais seulement la répartition de ses fruits. Reprenant les conclusions de Marx, elle estime que le problème réside dans le fait que les salariés, et plus largement les exclus, sont mal rémunérés pour la peine qu'ils dépensent pour le bien commun par rapport aux propriétaires ou à d'autres classes bénéficiant d'une naissance plus favorable ou de règles faites à leur avantage. Finalement, tout le monde espère être plus riche demain, et cette espérance tient le débat dans des limites étroites.

Cette fuite en avant ne s'explique pas seulement par l'espérance d'un gain de bien-être à moyen terme dans un contexte de sécularisation du monde (Gauchet, 1985) et de principe rationnel de perfectibilité de l'espèce humaine (Ferry, 1996). Le progrès défini comme croissance illimitée ne peut être réduite à un projet politique rationnel. Comme nous l'avons mentionné plus haut, il n'y a pas de raisonnement permettant de démontrer qu'un tel objectif est souhaitable à long terme. La théorie de la croissance infinie se pose pourtant comme rationalité universelle, échappant à la variabilité des cultures et des opinions. Elle se pose elle-même comme étant inscrite dans la nature humaine, à l'abri des contingences historiques. Elle se présente comme étant la condition nécessaire et suffisante du progrès. Et quand cela ne se produit pas, les analystes s'étonnent. On en voudra pour preuve cette citation d'un rapport des Nations-Unies sur la gouvernance mondiale : "il nous faut accepter que l'idée de progrès n'est pas seulement l'œuvre du destin, mais le fruit de notre travail" (Commission sur la Gouvernance Globale, 1994). Les analyses de l'OMC reposent sur les mêmes croyances : la convergence automatique de tous et de toutes vers le bonheur, sans besoin de politique. Cela se répète au niveau individuel : c'est ce qu'a constaté Alain Gras, dans son analyse de l'imaginaire des techniques de pointes (Gras, 1994), ou plus récemment la sociologue d'entreprise Michèle Descolonges, dans une intéressante comparaison entre la diffusion d'internet et l'électrification de la Russie dans les années 20 (Descolonges, 2002). Le progrès est un destin, une sorte de loi naturelle, qui existe tant que la croissance est maintenue. Le genre humain ne fait qu'accomplir ce pour quoi il a été créé. La foi dans la providence ne se manifeste nulle part mieux que lorsque " nous " parlons de " notre " espèce. Ce n'est pas à un projet rationnel que nous avons affaire, mais à une philosophie de l'histoire, une conception du destin de l'espèce humaine comme vecteur d'une artificialisation totale du monde. Hegel n'est pas mort, pas davantage que Rostow ou Marx. Les grands récits ne sont pas achevés. Il y a là un naturalisme redoutable : notre conception du destin de l'espèce humaine a la valeur d'une loi naturelle qui déciderait pour " nous ", et " nous " dédouanerait d'une pensée

<sup>2</sup> pour l'année 1999-2000 Voir le site web des annonceurs : <http://www.aacc.fr>

réellement politique. Si l'avenir est écrit, pourquoi en discuter ? Ne devons-nous pas avant tout continuer à acquérir des pouvoirs, que " nous " maîtriserons ? La " maîtrise " ne doit-elle pas venir d'elle-même avec le temps, par la main invisible ou plus généralement par le progrès – bref, par la providence ?

Dans cette vision, les problèmes tels que les pollutions nucléaires (déchets, explosions etc.) ou les changements climatiques sont des événements temporaires ou involontaires. Ce sont des " accidents " de parcours, des dysfonctionnements temporaires destinés à disparaître, rien de plus (Virilio, 2002). Rien n'est irréversible, de toute façon, car les pouvoirs de l'être humain, destinés à grandir sans cesse, pourront à l'avenir tout reconstruire. La substitution du capital technique au capital naturel est infinie en droit<sup>3</sup>. Il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter. Aucun des problèmes rencontrés ne doit remettre en cause les orientations fondamentales de l'action humaine, qui doit rester guidée par les mêmes objectifs et les mêmes rituels : produire et consommer davantage, modifier toujours plus la nature etc. Cette foi contribue aussi à expliquer le caractère tardif de la prise de conscience de la menace de changements climatiques. En 1959, alors que l'hypothèse est disponible depuis plus de 80 ans, Alain Michel, dans le mensuel *Science & Vie*, affirme encore avec véhémence qu'il n'y a " aucune raison de s'inquiéter " : il faut plutôt avoir confiance dans les pouvoirs de la science pour trouver les thermostats planétaires avant le déluge (Michel, 1959). Quand Alfred Sauvy affirme en 1973 que le niveau des mers risque de monter de 70 mètres (Sauvy, 1973), pas davantage de réaction, pas de renforcement des programmes de recherche, pas de remise en cause des émissions de gaz à effet de serre. De même, quand les partisans du nucléaire promettent l'élimination prochaine du danger constitué par les déchets nucléaires, ils n'ont pas à le prouver, c'est au contraire à ceux qui affirment qu'il y a danger de prouver leurs dires.

La théorie de la croissance infinie ne repose donc pas sur un projet conscient, scientifique ou rationnel, mais sur une conception de la nature, et en particulier de la nature humaine. Elle repose sur un ensemble de croyances non démontrables sur la nature ultime du monde, et ces croyances sont tenues pour vraies. Elles affirment que l'homme est homo faber et que son milieu est analogue à un entrepôt inerte et inépuisable de matériaux mis à sa disposition. Les ressources et les environnements sont inépuisables, soit qu'ils puissent être remplacés les uns après les autres, soit qu'ils soient effectivement épuisables. Si l'homme continue à suivre les normes mises en évidence par l'économie, la nature sera « remise à l'endroit » et nous connaîtront l'abondance et la fin de l'histoire.

### Relever les défis ou différer les problèmes ?

<sup>3</sup> Ce qui conduit par exemple à l'hypothèse d'une substituabilité infinie des services artificiels aux services naturels – cf. R. Solow, 1992 cité in GIEC, *Second Rapport d'Evaluation*, 1995, p. 139.

Les théories orthodoxes du développement de l'usage de l'énergie par la seule poursuite de la croissance économique reposent sur ces a priori lourds de sens. On l'a vu encore récemment en France, tout débat sur l'énergie présuppose que les protagonistes fassent allégeance à ce cadre de pensée. Or ceci conduit à occulter un certain nombre d'enjeux.

Premièrement, cela permet d'externaliser la plupart des maux liés à l'usage de l'énergie, sous prétexte que " un jour ", ils seront internalisés. Pourtant, ce n'est pas " nous " qui trouverons des solutions aux déchets nucléaires, aux changements climatiques, mais nos enfants. Ce n'est pas " nous " qui répondrons à la demande des pays du Sud à consommer comme nous quand les biens naturels (Flipo, 2004) se feront vraiment rares. En affirmant que " nous " trouverons les solutions " plus tard ", nous nous autorisons à reporter le problème sur les générations à venir. Cela devrait donner lieu à discussion, et même peut-être à référendum. La Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen, en préambule de la Constitution de l'An I, affirmait d'ailleurs que " Un peuple a toujours le droit de revoir, de réformer et de changer sa Constitution. Une génération ne peut assujettir à ses lois les générations suivantes ". Faire de l'humanité un sujet alors qu'il s'agit d'une multiplicité est donc très dangereux. Ajoutons à cela que les usages de la nature peuvent varier. Chaque culture entretient certaines relations avec sa nature. Il n'appartient pas à une génération de décider de manière irréversible de la nature d'autrui. " Nous " ne sommes pas les générations à venir. La naissance est l'irruption de l'étrangeté, et non pas seulement la continuité du même. Ne prenons pas nos désirs d'immortalité pour des réalités. Ne tombons pas dans ce piège bien connu des psychanalystes, qui consiste à vouloir que nos enfants ne soient que le prolongement de nos désirs insatisfaits. Rappelons-nous les phrases simples et lumineuses de Khalil Gibran, que chacun d'entre vous a certainement déjà rencontré sur son chemin de vie : " Vos enfants ne sont pas vos enfants / Ils sont les fils et les filles / De l'appel de la Vie à elle-même / Ils viennent à travers vous, mais non de vous / Et, bien qu'ils soient avec vous, / Ils ne vous appartiennent pas ". La nature ne nous appartient pas davantage que nos enfants. C'est une question de droit, pas de coûts / bénéfices. La modifier de façon irréversible, c'est s'autoriser à s'approprier l'avenir de nos enfants. Il est peut-être permis de le faire, mais seulement si l'on est sûr que cette modification est une amélioration. Or il n'y a rien de tel ni dans le génie génétique, ni dans les changements climatiques, bien au contraire.

Deuxièmement, dans la vision d'une nature entrepôt, il n'y a jamais de problèmes d'échelle ni de problème de perturbation des régulations naturelles. La nature est vue comme partout et toujours newtonienne : linéaire et réversible. Vu sous l'angle écologique, c'est faux : la nature, c'est plutôt un ensemble de régulations complexes et fragiles, faite de lieux singuliers ayant leurs caractéristiques et leurs lois propres. La consommation ne vient pas de nulle part : nous ne créons ni la matière, ni l'énergie. Nous ne faisons que modifier la nature, une nature qui est dynamique et non statique. Les déchets restent dans la nature et



ont leur devenir propre. Le cadre de pensée orthodoxe a beau affirmer que les déchets restent là où nous les avons mis, et sont donc confinés, cela ne les empêche pas d'évoluer et de produire leurs effets. S'ils sont biodégradables, tout va bien : ils sont réintégrés d'eux-mêmes dans les cycles naturels. Sinon, ils viennent perturber des régulations naturelles : changements climatiques, appauvrissement de la couche d'ozone etc. Dans la nature réelle, certaines modifications sont irréversibles, soit définitivement, soit à un horizon de temps très long : mort, déstabilisations climatiques, disparition de la diversité biologique, zones contaminées par les métaux lourds ou les radionucléides dont la durée de vie dépasse le million d'années etc. L'entrepôt de matériaux suppose en effet qu'un ensemble de régulations, humaines ou non, sont maintenues : conditions de marché, usages normalisés, stabilité des matériaux etc. Rien ne dit que ces régulations seront maintenues à l'avenir. Les indices contraires sont nombreux. La stabilité politique n'est pas garantie, et nous avons commencé à entamer sérieusement la stabilité écologique. Le pétrole assure par exemple aujourd'hui un rôle essentiel dans les régulations sociétales, ou tout laisse penser que le point à partir duquel le pétrole va se raréfier est "proche"<sup>4</sup>, du moins quand on considère la vitesse avec laquelle évoluent les infrastructures. Comment survivre dans une ville comme Los Angeles sans énergie pour les automobiles ? Eviter le désordre à Los Angeles ne justifie-t-il pas de faire la guerre pour obtenir l'énergie nécessaire au maintien des régulations ainsi construites ? La perturbation de régulations est créatrice d'une insécurité qui touche en premier lieu les plus faibles et ceux qui ne peuvent pas se payer les services d'une protection artificielle.

Troisièmement, la vision de l'entrepôt suppose qu'aucun élément naturel n'a de valeur en lui-même : tout bien ne peut venir que du travail humain. La main artificialisante est vecteur d'une réorganisation du monde selon « la rationalité économique ». Pourtant, la nature offre un grand nombre de biens : recyclage des déchets, régénération des sols, renouvellement des espèces etc. Ces biens ont été reconnus partout et toujours, enfin, jusqu'à l'époque industrielle : c'est l'usufruit, qui deviendra au XIX<sup>ème</sup> siècle la rente foncière, et qui peu à peu sera réduite à néant. On en vient aujourd'hui à essayer d'estimer économiquement la contribution de la nature au bien-être global (Costanza, 1997), mais le fait est là : cet aspect a été négligé et est encore aujourd'hui très largement négligé. D'ailleurs les instruments économiques, développés pour comptabiliser des marchandises échangeables sur un marché, aboutissent à des résultats clairement insatisfaisants. Les régulations naturelles sont en outre porteuses d'une sécurité que les artifices ne peuvent pas offrir. Les humains peuvent faillir, trahir, se comporter en passager clandestins. Quand les contrats ne sont plus respectés, quand on ne peut plus payer, les personnes se réorganisent à des niveaux de gouvernance plus bas : on l'a bien vu lors de la crise Argentine ou lors de l'effondrement de l'URSS. Ne pouvant plus avoir accès aux biens produits collectivement, les personnes n'ont pas d'autre choix que de se reposer sur les biens locaux, voire seulement

personnels. La protection de ces biens naturels, qui sont gratuits et présents en tous lieux, est donc une garantie minimale de liberté. Bien sûr, ils sont inégalement répartis : les terres ne sont pas identiquement fertiles. La biosphère n'est pas l'Eden. Mais ils sont quand même la première richesse des êtres humains, en particulier des pauvres au sens économique du terme c'est-à-dire des personnes qui n'ont pas accès à une source de revenu. Les forêts ont toujours accueilli tous les résistants du monde. Ce sont des endroits qui échappent à la normalisation sociale, et donc au contrôle des sociétés, fussent-elles totalitaires (Roux, 1999). Les biens naturels ne demandent pas d'organisation politique fiable pour être assurés puisque c'est la nature qui s'en charge. Ils sont souvent plus pérennes que les artifices, et ils sont gratuits. Or aujourd'hui ces régulations sont menacées, voire déjà détériorées, dégradées.

Quatrièmement, la théorie dominante suppose que tous les pays convergeront vers un même "niveau de vie", autrement dit vers l'organisation sociale observable aujourd'hui dans les pays industrialisés. Pourtant, on voit mal comment généraliser notre usage de l'énergie sans causer des dégâts probablement très supérieurs aux gains. La plus grande partie de l'humanité utilise très peu d'énergie, et elle la tire principalement de la biomasse. Exportées comme matières premières, les énergies fossiles sont en voie d'épuisement et cela à un prix qui dénie tout souci de partage puisqu'il se résume quasiment au prix d'extraction. Et les populations riveraines de l'extraction profitent rarement de ce commerce. Les entreprises qui font ce commerce sont rarement regardantes sur les dictateurs qu'il faut entretenir pour conserver ses droits de propriété, ainsi de la lutte des Ogonis contre Shell dans le détroit du Niger. La plupart des biens naturels utilisés aujourd'hui comme ressource ou comme environnement (déchets) sont des sources de basse entropie qui ont la caractéristique d'un stock fini (Georgescu-Roegen, 1979) : leur consommation est irréversible. Les mines ne se reconstituent pas davantage que les gisements fossiles. Seuls les flux renouvelables se régènèrent. Il y a en outre une loi d'airain des rendements décroissants : au-delà d'un certain point, l'énergie dépensée pour collecter la ressource dépasse celle produite par la ressource. Quelles sont les ressources qu'utiliseront les populations pauvres de la planète ? Les données de consommation matérielle sont très claires : la solution des désaccords sociaux du Nord et de l'élite transnationale par la croissance conduit à hypothéquer l'avenir des générations à venir et réduire les chances du Sud de voir ses conditions de vie s'améliorer. On ne trouvera pas une Amérique à chaque fois qu'on aura besoin de résoudre un conflit interne de répartition en Europe. La surcharge produit de l'encombrement, et l'encombrement déstabilise l'organisation du système tout entier. Cela vaut pour les gaz à effet de serre comme pour la circulation automobile. Eviter de déstabiliser le système suppose de réguler l'accès. La croissance du pouvoir des uns ne peut alors se faire qu'au prix de la réduction du pouvoir des autres. La liberté des uns se nourrit de la liberté des autres. L'espace écologique (Flipo, 2002) global n'est pas plus infini que l'espace sur une chaussée : il faut choisir, et les choix qui sont faits actuellement sont lourds de sens. D'aucuns craignent un

<sup>4</sup> Pic de Hubbert, <http://www.hubbertpeak.com>

apartheid global, un néo-colonialisme écologique (Agarwal et al. , 1999) : une minorité industrialisée continuant à utiliser les ressources en empêchant le reste du monde de consommer afin de ne pas remettre en cause son mode de vie. Quand on sait que

les pauvres en question disposent déjà de la bombe atomique (Inde, Chine), l'avenir semble être moins radieux que ce que les partisans de la mondialisation heureuse veulent bien croire...

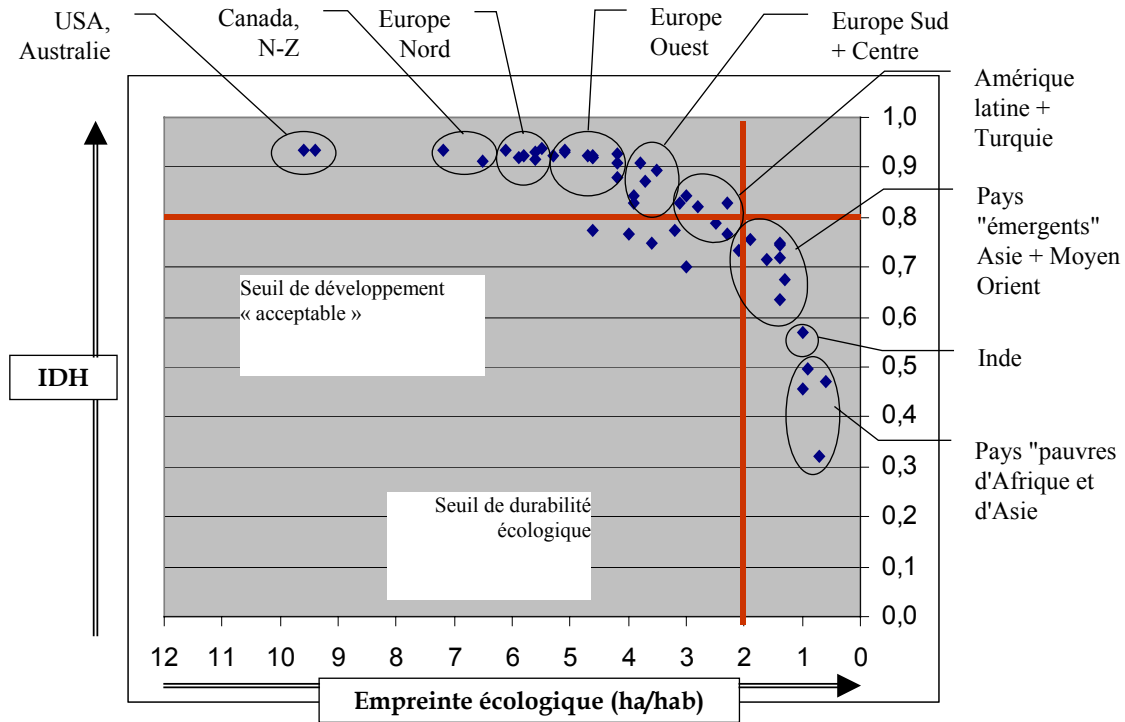


Figure 2. Comparaison des performances environnementales de 49 nations. Source Arnaud Boutaud (Boutaud, 2003).

Finalement, le problème n'est donc pas tant de libérer ou d'enchaîner Prométhée que de cesser de croire au mythe de l'homo faber et de son entrepôt de matériaux affirmant que l'avenir est déjà écrit et qu'il sera glorieux pour tous. Ce mythe nous masque les vrais enjeux. La croissance ne mène pas automatiquement au progrès pour tous et les raisons sont connues depuis longtemps. Comme l'a montré Ivan Illich (Illich, 1973), elles tiennent à la matérialité de la condition humaine, réaffirmé aujourd'hui dans la vision écologique du monde. Le développement actuel ne peut bénéficier qu'à une minorité, aussi y a-t-il urgence à repenser la question de l'énergie dans ce contexte, et non par secteur ou de manière réductrice.

### Conclusion : la voie de la sobriété ou le défi de la justice

L'énergie, c'est le feu qui anime les machines. Sans elle, fini les armées d'esclaves mécaniques, fini les bras non syndiqués qui travaillent jour après jour sans relâche et sans protester. Il ne reste que l'énergie musculaire et celle du soleil (vent, biomasse etc.). Aucune énergie n'est propre, gratuite et illimitée. Toutes provoquent certains désagréments, plus ou moins graves, plus ou moins irréversibles. Savoir qui supportera les désagréments est aussi important que de savoir à qui profiteront les avantages, ou savoir si ces avantages augmentent à un instant donné. Les machines ne sont pas nécessairement utiles : elles peuvent économiser de la fatigue et de la souffrance, certes, mais elles peuvent aussi accroître la production d'armes et de destructions, ou n'être au service que de quelques-uns. Le vrai problème est de repenser le bien commun. Il est certain aujourd'hui que la seule croissance économique nous mène vers l'abîme. Les tendances décrites par les scénarios tendanciels sont claires et unanimes (WEC, 2000 ; PNUD, 2000). A moins de supposer divers miracles technologiques, qui, encore une fois, seront à la charge des générations à venir, le monde court vers de graves crises.

Le problème n'est pas le niveau de vie et de confort : de nombreux scénarios montrent qu'il est techniquement possible de vivre avec un niveau de vie confortable, sans pour autant compromettre le bien-être d'autrui<sup>1</sup>. Des Etats comme le Sri Lanka ou le Kérala, en Inde, atteignent des niveaux de bien-être très élevés avec un impact écologique très réduit (cf. Figure 2). Le machinisme ne libère plus l'homme du travail. L'essentiel de l'effort aujourd'hui est consacré à produire des objets jetables ou créer des besoins supplémentaires. Cela a en outre justifié de mettre les êtres humains au travail. Nous n'avons plus le temps de rien, tout va trop vite, nous ne cessons de courir d'un travail à un autre : produire, consommer, remplir les papiers etc. Les autres cultures ont en général travaillé beaucoup moins que nous, considérant que leurs besoins économiques étaient satisfaits, comme l'a montré l'anthropologue Marshall Sahlins (Sahlins, 1976). Non, vraiment, le problème n'est pas là. Nous devons imaginer des voies de coopération humaine qui reposent sur le

partage et la reconnaissance de l'altérité, et non sur l'exploitation et la consommation. Ceci conduit à poser la question du sens de la vie, individuelle et en collectivité : avons-nous vraiment besoin de tout ce que nous consommons ? Sommes-nous prêts à payer le prix de cette surconsommation effrénée : société policière, apartheid mondial, conflits, déstabilisations écologiques etc. ? Ou voulons-nous un autre monde ? Dans ce second cas, l'autre monde commence par soi-même : nous devons être le changement que nous voulons voir advenir dans le monde. Moins consommer, c'est moins travailler, c'est agir pour un monde plus juste et plus solidaire. Comme l'affirmait déjà Gandhi, « il y a sur cette terre assez pour les besoins de chacun, mais non pour sa cupidité ».

La question des besoins doit donc être réouverte, avant que l'appétit de quelques-uns ne finisse par dévorer tous les autres. Cela signifie en particulier de rouvrir la question de la nature humaine. Oui, il faut l'affirmer avec force contre Bush et consorts, la justice veut que « notre mode de vie est négociable ». Il doit l'être pour que la mondialisation ne finisse pas en bain de sang. L'homo economicus à l'appétit insatiable est une fiction devenue dangereuse. Le progrès, ce n'est plus de produire et de consommer, mais de construire des sociétés durables, vivant en harmonie avec leur milieu naturel. Ceci se traduit, en termes de moyens, par le triptyque « sobriété, efficacité énergétique et énergies renouvelables »<sup>2</sup>, qui sont des moyens au service de la justice. Ce n'est pas une question de points de PIB, mais un enjeu de civilisation.

### Bibliographie

- Agarwal A., S. Narain & A. Sharma, 1999, *Green Politics*, New Delhi (India), Center for Science and Environment.
- AIE, 2000, *World Energy Outlook*, pp. 249-253.
- Arendt H., 1961, *La condition de l'homme moderne*.
- Arrhenius S., 1896, *On influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*, in *Philosophic Magazine of Sciences*, vol 41, no. 251, pp. 237-276. [En Ligne] (Page consultée le 30 novembre 2000) Adresse URL : <http://maple.lemoyne.edu/~giunta/Arrhenius.html> OU URL : [http://chimie.scola.ac-paris.fr/Site\\_de\\_chimie/hist\\_chi/text\\_origin/arrhenius/Arrhenius2.htm](http://chimie.scola.ac-paris.fr/Site_de_chimie/hist_chi/text_origin/arrhenius/Arrhenius2.htm)
- Boutaud A., 2003, *Développement durable, quelques vérités embarrassantes*, in *Problèmes économiques*, n°2800.
- Bringezu S. & H. Schutz, 2001, *Total material requirement of the European Union*.
- Commission sur la gouvernance globale, 1994, *Notre voisinage mondial*.
- Costanza R. & al., 1997, *The value of world's ecosystem services and natural capital*, in *Nature*, vol. 387, n°6230.
- Descologes M., 2002, *Vertiges technologiques*, Paris, La dispute.
- Ferry L., 1996, *L'homme-Dieu ou le sens de la vie*, Paris, Grasset.
- Flipo F., 2004, *Les biens naturels*, in *Le Banquet*, n°19-20, janvier.
- Flipo F., 2002, *L'espace écologique - Fondements d'une théorie politique de la dimension naturelle de la liberté*, in *Les Cahiers du Prose*, Sciences Po, Paris, juin/juillet.
- Gauchet M., 1985, *Le désenchantement du monde*, Paris, Gallimard.
- Georgescu-Roegen N., 1979, *La décroissance*, Editions Sang de la Terre.
- GIEC, 2001, *Troisième rapport d'évaluation*.

<sup>1</sup> Exemple en France des scénarios Négawatt : <http://www.negawatt.org> ou les scénarios de la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre (France) sur les sociétés pauvres en carbone : [www.effet-de-serre.gouv.fr](http://www.effet-de-serre.gouv.fr)

<sup>2</sup> Comme le proclame le « Manifeste négaWatt pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable » - [www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)

- Gras & al., 1994, *Face à l'automate - Le pilote, le contrôleur et l'ingénieur*, Paris, Publications de la Sorbonne.
- World Resources Institute, 2003, *Global trends*, [www.wri.org](http://www.wri.org) - voir aussi [http://www.wbcsdmobility.org/dialogues/files/pf\\_presentation.pdf](http://www.wbcsdmobility.org/dialogues/files/pf_presentation.pdf)
- Illich I., 1973, *Energie et équité*, Paris, Seuil.
- Jonas H., 1979, *Le principe responsabilité*, 3e éd., Paris, Flammarion.
- Kourilsky P. & G. Viney, 1999, *Le Principe de Précaution - Rapport au Premier Ministre*.
- Locke J., 1690, *Deuxième traité du gouvernement civil*, Chapitre V.
- Michel A., 1959, *Le charbon que nous brûlons réchauffe la Terre; conséquence possible : le déluge*, in *Science & Vie*, n°500, mai, pp123-126.
- Ministère de la Recherche (France), 2003, *La Recherche au service du développement durable*, Rapport intermédiaire, 16 janvier 2003, note 1 p.10. <http://www.recherche.gouv.fr/rapport/devdurable/ddinter.pdf>
- Nietzsche F., 1871, *La naissance de la tragédie*, §9 et §10.
- Platon, *Critias*, Paris, Garnier-Flammarion. Trad. Luc Brisson.
- PNUD, 2000, *World Energy Assessment*.
- Proudhon, 1840, *Qu'est-ce que la propriété ?*.
- Roux M., 1999, *Géographie et complexité*, Paris, l'Harmattan.
- Sahlins M., 1976, *Age de pierre, âge d'abondance*, Paris, Gallimard.
- Sauvy A., 1973, *Croissance zéro ?*, Paris, Calmann-Lévy.
- Solow R., 1992 cité in GIEC, *Second Rapport d'Evaluation*, 1995, p. 139.
- Vernadsky W., 1929, *La Biosphère*, Paris, Félix Alcan.
- Virilio P., 2002, *Ce qui arrive*, Paris, Galilée.
- Wackernagel M. & W. Rees, 1999, *Notre empreinte écologique*, Montréal, Editions Ecosociété.
- World Energy Council, 2000, *Energy for tomorrow's world – acting now !* (téléchargeable).

# PROTOCOLE DE KYOTO : Le cas du secteur résidentiel au Canada?

Par Gaëtan Lafrance<sup>1</sup>, Julien Genois et Martin Lemay<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Professeur, INRS, UQ, et GREEN Un. Laval., <sup>2</sup>Chercheurs, INRS, INRS-EMT, UQ, 1650 Blvd Lionel Boulet, Varennes, J3X 1S2, courriel: [lafrgaet@inrs-ener.uquebec.ca](mailto:lafrgaet@inrs-ener.uquebec.ca)

**Résumé :** Cet article compare les estimations de la consommation unitaire de chauffage dans le secteur résidentiel pour plusieurs régions canadiennes, y compris le Québec. L'étude repose sur l'analyse de plusieurs sondages effectués par Hydro-Québec et Ressources Naturelles Canada. La méthode utilisée est l'analyse conditionnelle de la demande (ACD).

Cette comparaison des consommations unitaires permet d'abord de déduire que le Québec consomme moins d'énergie finale par ménage pour le chauffage des locaux que le reste du Canada. Cette situation est d'abord liée au fait que la diffusion du chauffage électrique est plus importante au Québec qu'ailleurs. Mais la conversion en terme d'énergie utile semble également démontrer que le Québec consomme moins d'énergie par ménage qu'ailleurs au Canada. Cette situation différente entre le Québec et le reste du Canada nous permet d'explorer quelques pistes qui aideraient au respect du protocole de Kyoto dans le secteur résidentiel au Canada. Parmi ces mesures qui permettent de réduire les gaz à effet de serre dans le secteur résidentiel, la baisse de la température de chauffage et une augmentation de l'efficacité au niveau des brûleurs arrivent en tête de liste.

**Mots Clefs :** Efficacité énergétique, Kyoto, chauffage des locaux

**Abstract :** This paper compares unit space heating energy consumptions (USHEC) per household in the Canadian residential sector. The study is based on several surveys conducted by Hydro-Québec and Natural Resource Canada. The approach used to estimate USHEC is the conditional demand analysis (CDA).

A comparison between Québec and other Canadian regions seems to show that Québec consumes less energy per household for space heating than other regions in Canada. A further analysis seems to show that the Québec dwelling stock appears more efficient in many aspects. Taking lessons from these comparisons, simple options as lowering heating temperature and a better control of burner can be applied in the Canadian residential sector to reach the Kyoto Protocol.

**Keywords:** Energy efficiency, Kyoto, space heating

## Introduction

L'engagement pris par le Canada par rapport au protocole de Kyoto suppose des mesures et des actions qui diffèrent considérablement selon les secteurs de consommation et de production d'énergie. Le succès de cet engagement à réduire les émissions de gaz à effet de serre au Canada repose sur la prise en compte des caractéristiques régionales. La structure économique est différente, le comportement des consommateurs est variable, la disponibilité des ressources est différente, etc. Ces différences par région et par secteur expliquent, par exemple, que l'Alberta émet six fois plus de dioxyde de carbone que le Québec par habitant (tableau 1).

Région	GES per capita (2000)	Émissions Kt éq. CO2 (2000)	Croissance 1990-2000
Canada	23,5	724 519	19,6 %
Québec	12,3	90 400	2,3 %
Ontario	17,7	207 000	14,4%
Alberta	74,1	223 000	30,4%

Tableau 1 : Émissions de Gaz à effet de serre (GES) au Canada.  
Source : Environnement Canada (2001) et Statistiques Canada (2002).

Cet écart entre le Québec et d'autres provinces comme l'Alberta est souvent attribué au secteur de production d'énergie : par exemple, dans le secteur de l'électricité, l'utilisation de l'hydroélectricité au Québec est nettement avantageuse d'un point

de vue « émission de gaz à effet de serre (GES) ». À l'inverse, on le sait, le principal litige entre l'Alberta et le reste du Canada pour le respect de Kyoto se situe au niveau de la production de pétrole et de gaz naturel pour fin d'exportation. Comme en Alberta on passe graduellement à des techniques d'exploitation<sup>1</sup> plus intensives en énergie, les émissions de gaz à effet de serre ne peuvent qu'augmenter. Le cas de l'Ontario est semblable : il sera difficile de respecter Kyoto dans le secteur de la production d'énergie puisque la part des renouvelables et du nucléaire est appelée à baisser, notamment au profit du gaz naturel.

Afin de respecter globalement Kyoto dans ces provinces, il serait donc logique d'agir plus fortement au niveau de certains secteurs de consommation qui offrent une marge de manœuvre plus importante. À cet effet, le cas du secteur résidentiel est intéressant. Pourtant lorsque l'on examine le bilan du secteur résidentiel depuis 1990, il n'y a pas lieu de s'inquiéter (voir le tableau 2). Alors que l'augmentation des gaz à effet de serre a été importante pour l'ensemble des secteurs (11,0% globalement), la consommation d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre dans le résidentiel sont restées à peu près stables.

Dans le futur, en se fiant aux prévisions canadiennes pour l'horizon 2010 (tableau 3), les émissions liées au secteur du bâtiment en général et au résidentiel en particulier resteront marginales par rapport à d'autres secteurs. Deux questions se posent cependant : a) quelles mesures prendre pour atteindre la réduction proposée de 8Mt dans le secteur des bâtiments, et plus précisément dans le secteur résidentiel si on revient au sujet de l'article? b) Peut-on aller plus loin?

### **Le secteur résidentiel : comparaisons canadiennes**

Le tableau 4 montre que le secteur résidentiel du Québec représente environ 17% de ses besoins totaux d'énergie secondaires, ce qui est dans la moyenne nationale. Par contre, il est intéressant de constater que le Québec est nettement en bas de la moyenne nationale pour la consommation d'énergie par ménage et pour les émissions de GES liées au secteur résidentiel. Les Albertains en particulier consomment environ deux fois plus d'énergie par ménage que les Québécois. Ces statistiques montrent aussi que l'Ontario et l'Alberta représentent respectivement 15.5% et 13.3% des émissions liées au secteur résidentiel canadien.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts de consommation. La pénétration du chauffage électrique est certes le principal facteur : la répartition du principal combustible de chauffage dans les logements individuels est de l'ordre de 70 % électrique au Québec, 7 % dans les Prairies (Manitoba, Saskatchewan et Alberta).. On sait également que la température est plus froide en

moyenne dans les Prairies qu'à Montréal ou Québec.

Mais cette situation peut-elle s'expliquer que par les différences de climat ou par la pénétration plus importante du chauffage électrique au Québec? Les résultats de nos travaux semblent démontrer que non.

Cet article montre qu'un potentiel en termes d'efficacité est possible dans le résidentiel, en particulier dans les provinces où le chauffage de nature thermique est prédominant. Cela permettrait de réduire la pression sur les autres secteurs, comme ceux du transport et de la production d'énergie.

Une question demeure cependant, comment évaluer ces différences d'énergie utile pour le chauffage par province et par type de logement, cela dans un but d'estimer le pas à franchir pour réduire les émissions de GES pour les provinces les plus polluantes?

### **La méthodologie**

Depuis le début des années 1980, les organismes qui réalisent des prévisions énergétiques se sont convertis de plus en plus vers des modèles technico-économiques. Dans le secteur résidentiel en particulier, l'utilisation de ces modèles exige des estimations détaillées des consommations d'énergie par usage, ces usages étant le chauffage des locaux et de l'eau chaude ainsi que le besoin d'énergie lié aux équipements ménagers, à l'éclairage et à tout autre équipement de la maison.

Il existe trois méthodes pour estimer la consommation d'énergie par usage :

- a) La technique du mesurage de la consommation chez un certain nombre de clients;
- b) Les modèles de simulation d'ingénierie qui calculent pour un certain nombre de maisons typiques le bilan énergétique des flux de chaleur en fonction des degrés jours observés dans une région donnée;
- c) L'analyse conditionnelle de la demande (ACD) qui est une méthode statistique reliant la consommation d'un échantillon de clients avec leurs caractéristiques particulières à la fois techniques (qualité du logement) et socio-économiques (revenu, âge des répondants, techniques, etc.).

---

<sup>1</sup> Comme exemple on peut citer l'exploitation croissante des sables bitumineux.

	Canada Mégatonnes 1990	Canada Mégatonnes 1999	Émissions de GES <sup>1</sup>	Consommation d'énergie <sup>1</sup>	Intensité en gaz à effet de serre de la consommation d'énergie <sup>2</sup>
Résidentiel	69,7	69,9	0,3	1,3	-1,0
Commercial	47,6	54,1	13,7	13,4	0,2
Industriel	141,3	150,6	6,6	11,4	-4,3
Transport	135,1	161,6	19,6	20,3	-0,5
Agricole	13,7	16,2	18,2	15,4	2,0
Total	407,4	452,4	11,0	12,2	-1,1

Tableau 2. Facteurs influant sur les émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation d'énergie secondaire, Canada 1990-1999. Source : L'évolution de l'efficacité au Canada de 1990 à 1999, OEE, RNCAN, 2001.

	Transport	Bâtiment <sup>1</sup>	Émetteurs industriels <sup>2</sup>	Autres <sup>3</sup>	Total
Émissions 2010	206	84	425	94	809
Réduction <sup>4</sup>	21	8	96	50	180

Tableau 3. Réduction d'émissions de GES par secteurs au Canada en Mt : scénario de base en 2010, 1.- Le résidentiel représente environ 56% des émissions liées au bâtiment, 2.- Secteur pétrole, gaz, génération d'électricité, industries, 3- Utilisation des terres (agriculture, foreries), marché international (permis échangeables), 4.- Réduction en deux étapes : a) actions en cours et puits, b) nouvelles actions. Source : Plan du Canada sur les changements climatiques, oct. 2002.

Région	Énergie Totale <sup>1</sup>	Combustible <sup>1</sup>	Cons/ménage <sup>2</sup>	GES <sup>3</sup>
Canada	17.3	14.1	31487	12.5
Québec	17.6	9.1	25334	9.1
Ontario	19.7	17.0	33420	15.5
Alberta	15.0	15.4	49568	13.3

Tableau 4. Importance du résidentiel dans la consommation d'énergie secondaire et des émissions de GES (% du total pour l'an 2000). Source : Compilé à partir du catalogue 57-003 de Statistique Canada. 1.- Part du résidentiel sur les besoins totaux, tout secteur confondu : énergie totale toute forme confondue, combustibles fossiles exclusivement, 2.- Consommation par ménage en kWh par an, tout type de logement, 3.- Compilé à partir de la base de données du Ministère des Ressources Naturelles du Québec. On inclut aussi les fermes. Pour les logements exclusivement, les émissions totales de GES sont inférieures aux valeurs présentées. Par exemple, au Québec, la part du résidentiel est de l'ordre de 7% au lieu de 9.1%

Étant donné que nulle méthode n'est parfaite, chacune est complémentaire et utile.

En ce qui concerne la technique du mesurage et les modèles de simulation, le désavantage majeur est lié à leur faible échantillonnage. On ne peut donc pas avoir une bonne représentation des facteurs fort variés qui expliquent la consommation d'énergie par ménage. On sait par exemple, que les normes de construction sont très différentes selon les époques de construction. On sait également que le nombre de personnes dans un ménage et leur âge sont déterminants pour le niveau de consommation.

Une troisième approche, l'analyse conditionnelle de la demande d'énergie (ACD) proposée par Parti et Parti (1980), permet partiellement de combler les lacunes des deux premières. L'approche est simple et relativement peu coûteuse. Elle permet de tester l'influence de variables non techniques et par conséquent d'introduire indirectement les comportements des consommateurs.

L'ACD est une méthode de régression qui a pour but de désagréger la consommation totale d'énergie de chaque ménage échantillonné à travers l'ensemble des équipements existants, même si la consommation spécifique des équipements est inconnue. Notre expérience passée a montré que la valeur des résultats est cependant liée à la qualité des sondages. Un des problèmes souvent rencontré est lié à la colinéarité des variables. Ce problème survient lorsque plusieurs équipements ont des taux de diffusion élevés, ce qui est le cas de certains équipements ménagers : tous ont un frigo, une cuisinière, un téléviseur, etc.

À la lumière de ces expériences, il apparaît que la méthode ACD est très utile pour estimer la consommation de certains usages, mais pour d'autres usages, la méthode a toujours des limites. En général, les usages comme le chauffage des locaux et le chauffage de l'eau ressortent bien et sont reproductibles d'un sondage à l'autre.

Cette méthode a surtout été appliquée pour le secteur électrique pour des raisons évidentes que la consommation d'électricité d'un ménage, seule valeur connue, correspond à plusieurs usages dont les valeurs ne sont pas connues. Les analyses faites au niveau des sondages de RNCAN démontrent également que la méthode s'avère très intéressante pour analyser les usages au gaz naturel. Une brève description mathématique de cette approche est présentée en annexe 1.

#### *Les sondages*

L'analyse conditionnelle de la demande (ACD) a été effectuée avec succès pour tous les sondages d'Hydro-Québec depuis 1979 (périodicité d'environ 4 ans). Les analyses ACD ont également été effectuées pour les trois sondages de Ressources Naturelles Canada (RNCAN) depuis 1993. À titre d'exemple, trois références sont proposées : Lemay, Genois et Lafrance (2002), Lafrance, Germain et Jacques (2001), Lafrance et Perron (1974).

Dans la comparaison des sondages, il faut cependant considérer deux facteurs particulièrement importants pour l'analyse ACD :

- a) La demande de chauffage varie selon le nombre de degrés-jours observés; cela implique donc une normalisation du paramètre température pour bien comprendre ce qui se passe. Les derniers sondages effectués en 1997 et 2001 correspondent à des années particulièrement chaudes, ce qui peut causer de graves erreurs d'interprétation des résultats.
- b) La qualité des sondages varie d'un organisme à l'autre, et d'une année à l'autre. Bien que les sondages de RNCAN soient de la même taille que ceux conduits par Hydro-Québec (environ 10,000 répondants), ils sont pénalisés par deux facteurs importants : a) le taux de recouvrement des factures est relativement faible (chez Hydro-Québec on a accès à toutes les factures des clients); b) pour un même nombre de répondants, le sondage canadien couvre l'ensemble du Canada et donc un plus grand nombre de consommateurs; la représentation par province est parfois déficiente.

Parmi les autres différences existantes entre les sondages de RNCAN et Hydro-Québec, il faut signaler le fait que RNCAN a obtenu une partie des consommations de gaz naturel par client, ce qui permet une analyse ACD. Hydro-Québec n'a que les factures d'électricité.

#### *La consommation par usage*

Pour ce qui est de l'estimation de la consommation de chauffage par l'approche ACD, il faut réaliser qu'il s'agit de chauffage net, c'est-à-dire de l'énergie fournie par le système de chauffage. Pour effectuer une correction de température – cas des années plus chaudes – il faut considérer le chauffage brut qui est la somme du chauffage net et des effets croisés de chauffage liés à l'utilisation des autres équipements dans la maison. La correction pour le paramètre température peut-être complexe si on considère tous les paramètres de transfert de chaleur. Pour les besoins de cet article, nous avons utilisé un facteur de correction simple basé sur les degrés-jours de chauffage observés pour une année donnée sur les degrés-jours moyens.

En analyse ACD, la première précaution à prendre est de diviser l'échantillon en classe homogène de consommation. Le premier paramètre considéré est l'année de construction du logement. En divisant par âge de construction, on tient notamment compte des normes de construction qui ont varié au cours du temps. Dans cet article, nous ne présenterons pas les résultats détaillés par âge de construction, mais nous y ferons référence à plusieurs reprises. Il est important de noter que les maisons dites neuves sont des maisons construites après 1990.

Finalement il est important de noter que les résultats présentés ne couvrent pas tous les sondages effectués et qu'ils correspondent



essentiellement aux maisons unifamiliales.

### Résultats historiques : Québec

Les travaux de Lafrance et Perron (1994) indiquent que le Québec semble avoir réalisé des économies importantes de chauffage net entre 1979 et 1984 et cela pour tous les types de chauffage électrique (voir résultats partiels dans le tableau 5). Cette économie d'énergie peut être attribuée en gros à quatre facteurs :

- a) Une meilleure étanchéité due à des normes plus sévères;
- b) Une baisse moyenne de la température de chauffage liée à un contrôle par pièce des chauffages radiants à une prise de conscience des consommateurs de réduire leur consommation d'énergie;
- c) Une augmentation des effets croisés de chauffage liée à diffusion accrue des équipements ménagers;
- d) L'augmentation de la part relative des maisons neuves.

Une analyse détaillée (non illustrée dans les tableaux) montre cependant que les deux premiers facteurs sont prédominants. En d'autres mots, cela indique donc que les divers programmes d'efficacité mis en place au Canada et au Québec pendant la période 1979-1984 ont eu un impact réel.

En première analyse, une comparaison des estimés de chauffage électrique unitaire de 1979 à nos jours (tableau 5) indiquerait que cette diminution du chauffage net a été à tout le moins durable. Comme les maisons récentes satisfont à des normes plus sévères de construction, une comparaison du parc de 1979 avec celui de 2002 montre une réduction progressive des consommations moyennes de chauffage. Mais depuis 1984, les gains d'efficacité ont été moins importants qu'entre 1979 et 1984.

Pour éviter les erreurs d'interprétation, il faut cependant normaliser en fonction des degrés-jours observés, la superficie du logement et les caractéristiques des ménages. Par exemple, il ne

faut pas négliger le fait que les ménages récents disposent d'un revenu plus élevé et possèdent plus d'équipements qu'il y a 20 ans. Cette diffusion plus grande des équipements occasionne des effets croisés de chauffage plus importants.

Parmi les résultats intéressants provenant des travaux ACD, il faut noter qu'en général, les systèmes radiants (à plinthes en particulier) consomment moins que les systèmes centralisés, de type air pulsé par exemple. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences. Par exemple, le contrôle par pièce dans le cas des plinthes facilite l'abaissement de la température moyenne sans perte de confort pour l'occupant.

Une fois tous ces facteurs analysés, on peut déduire l'impact des programmes d'efficacité énergétique. L'analyse successive des estimés de chauffage montre donc une cassure entre 1979 et 1984. Par la suite, la baisse du chauffage moyen est progressive. Pour 2002, la consommation plus faible du chauffage est attribuée au fait que les degrés-jours de chauffage ont été beaucoup plus faibles que prévu.

En d'autres mots, la variation observée entre 1979 et 1984 peut être attribuable à des gains d'efficacité. Il faut savoir que l'on était en pleine politique nationale de l'énergie et qu'Hydro-Québec a fait des campagnes d'information sur les bénéfices de modifier les comportements de consommation : la baisse de la température de chauffage faisait partie des campagnes d'information diffusées. Visiblement les consommateurs québécois ont réagi à ces programmes en isolant plus leur maison et en modifiant leur comportement en matière de contrôle de la température de chauffage. Résultat, le gain observé par ménage pour ceux utilisant le chauffage électrique a été de l'ordre de 38%. Pour ceux qui avaient des chauffages type radiant, le gain a été de 36%.

Système	Enquête 79	Enquête 84	Enquête 89	Enquête 2002
Central air chaud	16226	12538	12642	9431
Radiant	17528	11265	9873	7985

Tableau 5 Estimation des consommations de chauffage électrique au Québec : parc existant (kWh par ménage par an, unifamiliale). Source : Rapports périodiques d'analyse ACD : Hydro-Québec. Note : La correction pour le paramètre température n'est pas incluse. Pour l'enquête 2002, par exemple, les degrés-jours de chauffage étaient plus faibles que la moyenne, ce qui explique une estimation plus faible pour le chauffage.

Évidemment, ces résultats dépendent de la qualité des sondages et des limites de la méthode ACD. Mais aucun doute ne subsiste sur le fait que le Québec a pris un virage majeur en faveur de l'efficacité à cette époque. Voyons si au Canada ce virage a été aussi révélateur.

### Comparaison Canada/Québec

À la lumière des résultats obtenus pour le Québec, la comparaison avec le reste du Canada doit évidemment prendre en compte les différences régionales en terme de climat et de caractéristiques des ménages ainsi que la diffusion des types de chauffage. Mais toute analyse doit également se référer au contexte historique en matière programme d'efficacité.

#### Les programmes d'efficacité

Il faut savoir que le gouvernement du Québec et Hydro-Québec ont proposé des programmes successifs d'économie d'énergie qui en général n'ont pas eu la même intensité dans les autres provinces. En outre, si le programme national du début des années 1980 s'appliquait à tous les citoyens canadiens, la réponse par province n'a pas été la même.

Cette prise de conscience du Québec de mieux construire les habitations a débuté avec le programme des normes *Novelec* au début des années 1970. L'objectif premier d'Hydro-Québec n'était pas l'efficacité, mais une opération de marketing. En forçant les clients désireux d'avoir un chauffage électrique à mieux isoler leur maison, la facture des clients apparaissait ainsi plus basse, même si le prix unitaire de l'électricité était plus élevé que celui du mazout.

Lors de la politique nationale de l'énergie, au début des années 80, Hydro-Québec a renchéri les subventions du fédéral en donnant des subventions pour la conversion du chauffage au mazout et en instituant le programme bi-énergie. Plusieurs programmes de promotion de l'efficacité ont également été mis en place à la fin des années 70 par le gouvernement du Québec et Hydro-Québec. Finalement, les normes de construction au Québec ont été renforcées en 1974, 1977 et en 1982.

En conséquence cet effort soutenu du Québec a permis d'avoir une certaine avance par rapport aux autres régions du Canada, ce qui explique la consommation moyenne plus basse d'énergie par ménage.

#### Les aspects techniques

Dans la comparaison inter-région, il faut s'assurer de comparer les choses sur la même base. En prenant les cas extrêmes du Québec et de l'Alberta, par exemple, on observe des taux de diffusion des systèmes de chauffage radicalement opposés à deux points de vue :

a) Au Québec, la principale forme d'énergie pour le

chauffage est l'électricité; le principal système de chauffage est de type radiant, donc plus efficace : gain de 15% environ sur le chauffage utile si on se base sur les études d'Hydro-Québec.

b) En Alberta, la principale forme d'énergie de chauffage est le gaz naturel, ce qui suppose que l'on doit corriger les estimés selon l'efficacité de la fournaise; de plus le principal système de chauffage est de type *air pulsé*, renommé moins efficace qu'un système radiant avec contrôle par pièce si on se fie aux analyses ACD effectuées historiquement.

Afin de comparer les résultats par région canadienne, nous avons donc suivi l'algorithme suivant :

1. Pour le Québec, nous avons utilisé les estimés pour le chauffage électrique de type *air pulsé*, et non ceux de type *radiant*.
2. Dans l'étude canadienne, les trois provinces des prairies sont traitées ensemble pour des raisons de taille des échantillons; mais il faut savoir que les résultats liés au gaz naturel correspondent en gros à la situation de l'Alberta et de la Saskatchewan;
3. Pour les prairies, nous avons utilisé les résultats ACD effectués pour les usages au gaz naturel, puis nous avons estimé une consommation d'énergie utile de chauffage en supposant un rendement moyen de la fournaise à 70%; ce chiffre de 70% ne provient pas d'une enquête ou d'une étude précise; il s'agit plutôt d'une hypothèse qui est généralement utilisée par les prévisionnistes en demande lorsqu'il s'agit de faire les bilans par forme d'énergie dans le secteur résidentiel. Bien qu'approximatif, cette hypothèse est en général du bon ordre de grandeur si on calcule le ratio (ventes de gaz naturel)/(nombre de logements utilisant le gaz pour le chauffage).
4. Les résultats du Québec et des prairies ont ensuite été normalisés en fonction des degrés-jours moyens par région.

Les tableaux 6 et 7 présentent d'abord les estimés de chauffage au gaz et à l'électricité en termes d'énergie achetée ou finale. Déjà, on note un écart important entre le Québec et le reste du Canada. Mais pour avoir une idée plus juste, la consommation des systèmes au gaz naturel est corrigée pour la ramener en énergie utile ( $E_{\text{utile}}$ ) selon la formule suivante :

$$E_{\text{utile}} = E_{\text{finale}} * F_t * F_r$$

Où

$E_{\text{finale}}$  = énergie finale en kWh par ménage par an  
 $F_t$  = Facteur correcteur moyen pour les degrés de chauffage = 18% supérieur dans les prairies par rapport au Québec  
 $F_r$  = correction pour le rendement du brûleur de la fournaise = .70

	Enquête 93 Canada	Enquête 97 Canada	Hydro-Québec Québec <sup>1</sup>	Modèle 2002 Québec <sup>2</sup>
Parc existant				
Central <sup>3</sup>	14129	15764	15677	9431
Radiant	10068	12075	11500	7985

Tableau 6. Chauffage électrique : comparaison entre le Québec et le Canada (kWh/ménage/an).  
1.- Ce sont les estimations retenues pour le modèle REEPS, version 2002, 2.- Avec le sondage de 2002, l'année de référence était beaucoup plus chaude que la normale (environ 14%), 3.- Central = système centralisé en mode air pulsé.

Le tableau 7 montre que même en considérant toutes les corrections de température et de rendement, les besoins de chauffage au Québec en termes d'énergie utile seraient inférieurs d'environ 38% à ceux des Prairies : 14090 kWh/Ménage au lieu de 22594 kWh/Ménage. Or, ce chiffre correspond à peu de choses près au gain d'efficacité observé entre 1979 et 1984 au Québec. Ailleurs au Canada, les écarts avec le Québec sont également significatifs.

Qu'est-ce que cela signifie en termes de gain d'efficacité possible pour les habitations dans les Prairies? Probablement que l'affirmation de récupération de 38% d'énergie n'est pas réaliste pour les raisons suivantes :

- D'abord ces chiffres agrégés cachent d'autres réalités techniques et sociales que nos modèles ne peuvent prendre en compte de façon précise. Par exemple, quelle est la part réelle des effets croisés de chauffage? Pour avoir une meilleure idée des mesures d'économie à effectuer, il faudrait une enquête exhaustive qui n'existe pas.
- Puis, au Québec, il faut bien réaliser qu'une grande partie des gains est attribuable aux normes de construction plus sévères dans les maisons neuves construites depuis le début des années 70. Or d'un point de vue économique, certaines mesures sont inabordable dans le domaine de la rénovation.
- Finalement, il faut bien comprendre la limite de notre approche à tous les niveaux. Que cache ce 38% sur la question des rendements du brûleur par exemple? Si on met un rendement inférieur à 70%, l'économie sur l'enveloppe est moindre. À l'inverse, si le rendement de la fournaise est supérieur, cela signifie que les économies d'efficacité sont moindres.

Cela dit, nul doute que l'écart entre ceux qui chauffent à l'électricité au Québec et ceux qui se chauffent au gaz dans les Prairies indiquent des écarts d'efficacité. On peut séparer le problème en trois :

- a) Cas 1 : agir au niveau de l'efficacité de l'enveloppe par des programmes ciblés de subventions;
- b) Cas 2 : changer le comportement des consommateurs en termes de niveau de température de chauffage, par des

campagnes d'information ou par l'installation de thermostats programmables.

- c) Cas 3 : faire un meilleur suivi des brûleurs : selon nos estimés le rendement de 70% utilisé pour nos calculs est même optimiste;

Avec les mesures proposées en 2 et 3, sans encore toucher à l'enveloppe de la maison, un gain d'efficacité est donc possible pour les habitations qui ont un chauffage au gaz, et cela partout au Canada. En extrapolant pour le reste du Canada les résultats obtenus pour les prairies, une réduction d'au moins de 10% des émissions est possible dans le secteur résidentiel tout simplement en jouant sur l'efficacité de la fournaise. Techniquement des rendements de 77% sont tout à fait possibles avec un bon suivi. Un autre 10% est également possible en jouant sur les comportements en matière de température de chauffage moyen. En d'autres termes, sans grand investissement, il est possible de respecter Kyoto dans le secteur résidentiel (réduction de 6% du niveau de 1990), et même d'en faire plus.

Évidemment tous ces résultats restent à être confirmés par des études plus exhaustives. Mais bien que nous soyons conscients de l'imprécision de nos avancés, le fond de nos conclusions semble robuste.

## Conclusion

Le respect de Kyoto dans le secteur résidentiel au Canada n'est pas aussi problématique que dans d'autres secteurs. À preuve, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté marginalement entre 1990 et 2000. Par contre, la comparaison des émissions par province montre que des réductions sont possibles dans la plupart des provinces canadiennes. En comparant le bilan du Québec avec ceux des autres provinces, on peut déduire que des économies importantes sont possibles dans le cas du chauffage des locaux. Dans les Prairies, par exemple, une partie de l'écart de 38% en termes d'inefficacité pourrait ainsi être comblée en proposant des programmes qui améliorent l'étanchéité des habitations. Mais des mesures moins coûteuses sont d'abord à considérer à deux niveaux : faire un meilleur suivi des rendements au niveau des brûleurs, une sensibilisation des consommateurs au fait qu'une baisse de la température moyenne est rentable.

	Central eau <sup>3</sup> (Finale)	Central air <sup>3</sup> (Finale)	Central air <sup>3</sup> (Utile <sup>1</sup> )
Canada Parc existant (gaz)			
Enquête 97	36660	27194	19035
Enquête 93	35055	27080	18958
Canada Stock neuf (gaz)	28222	26222	18350
Prairies : Parc existant (gaz)	43167	32278	22594
Québec Stock existant (électrique)	---	11940	11940
Québec Stock existant (électrique)	---	---	14090 <sup>2</sup>

Tableau 7 Chauffage: énergie finale et utile (kWh/ménage par an),

1.- Correction du rendement de la fournaise = 70%, 2.- Résultat de 2002 corrigé pour le facteur température Prairies/Québec, 3.- Central = mode air pulsé ou avec caloporteur à eau chaude.

## Conclusion

Le respect de Kyoto dans le secteur résidentiel au Canada n'est pas aussi problématique que dans d'autres secteurs. À preuve, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté marginalement entre 1990 et 2000. Par contre, la comparaison des émissions par province montre que des réductions sont possibles dans la plupart des provinces canadiennes. En comparant le bilan du Québec avec ceux des autres provinces, on peut déduire que des économies importantes sont possibles dans le cas du chauffage des locaux. Dans les Prairies, par exemple, une partie de l'écart de 38% en termes d'inefficacité pourrait ainsi être comblée en proposant des programmes qui améliorent l'étanchéité des habitations. Mais des mesures moins coûteuses sont d'abord à considérer à deux niveaux : faire un meilleur suivi des rendements au niveau des brûleurs, une sensibilisation des consommateurs au fait qu'une baisse de la température moyenne est rentable.

De telles mesures permettraient probablement d'enlever de la pression sur d'autres secteurs, dont celui de la production d'énergie.

Bien que nos résultats fassent la démonstration que des rattrapages soient possibles, d'autres travaux sont nécessaires pour améliorer leur précision et surtout pour mieux analyser le gisement des économies en terme économique.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Hydro-Québec et l'Office de l'efficacité énergétique de Ressources Naturelles Canada pour leur support financier continue. Grâce à ce support financier, les analyses de sondage successives ont mené à cet article. Plus particulièrement, nous tenons à remercier nos collaborateurs dans ces institutions, notamment, M Adelhakim Seinoun et Jean-François Bilodeau.

## Bibliographie

- Hydro-Québec, Sondages périodiques, secteur résidentiel, 1979 à 2002.  
 Hydro-Québec, Travaux périodiques ACD dans le secteur résidentiel : 1989 à 2002.  
 Gaëtan Lafrance, Doris Perron, (1994) *Residential Electricity Demand in Québec*, Energy Studies Review, vol. 6, number 2.  
 Gaëtan Lafrance, Stéphane Germain, Christiane Jacques (INRS), Jean-François Bilodeau (RNCAN), (2001) *Analyse ACD dans le secteur résidentiel au Canada*, Rapport final, Ressources Naturelles Canada, Office de l'efficacité énergétique.  
 Martin Lemay, Julien Genois, Gaëtan Lafrance (INRS), Abdelhakim Sennoun (HQ) (2002), *Analyse ACD dans le secteur domestique et agricole : sondage 2002*, Hydro-Québec, Direction Planification et contrôle, 20 décembre 2002.  
 Ressources Naturelles Canada (2001), Office de l'efficacité énergétique, Évolution de l'efficacité énergétique au Canada de 1990 à 1999, Ottawa, juillet 2001.  
 Ressources Naturelles Canada, Office de l'efficacité énergétique, Rapports sur les sondages résidentiels effectués en 1973, 1977, 2000.  
 Parti, M. and Parti, C. (1980) *The total and appliance specific conditional demand for electricity in the residential sector*, The Bell Journal of Economics.

## Annexe I : Théorie de l'ACD

Le modèle proposé par l'analyse conditionnelle peut s'exprimer mathématiquement de la façon suivante:

Soit N le nombre d'usages considérés, alors la consommation de l'usage  $i$  est donnée par

### Équation 1

$$E_i = f_i(V) \quad i = 1, \dots, N$$

où  $E_i$  est la consommation de l'usage  $i$ ,  $f_i$  est la fonction de demande en énergie de l'usage  $i$  pour les ménages qui possèdent cet usage et  $V$  est un vecteur de variables explicatives des comportements ou des caractéristiques techniques des ménages.

Si on suppose que  $f_i$  est une fonction linéaire, alors l'

Équation 1 devient:

**Équation 2**

$$E_i = \sum_{j=0}^M b_{ij} * V_j = b_{i0} + \sum_{j=1}^M b_{ij} * V_j, \quad i = 1, \dots, N$$

où  $V_j$  est la composante  $j$  du vecteur  $V$  (on suppose que le vecteur  $V$  possède  $M+1$  composantes) avec  $V_0 = 1$ . Les  $b_{ij}$  sont les  $M$  paramètres de la  $i^e$  fonction de demande, et  $b_{i0}$  est l'ordonnée de la droite de régression de l'usage  $i$ .

Mais nous ne connaissons pas les consommations  $E_i$ , seulement la consommation totale en électricité soit

**Équation 3**

$$E = \sum_{i=0}^N E_i$$

où  $E_0$  est la consommation des divers usages non spécifiés parmi les  $N$  usages. Alors, on peut exprimer la consommation totale en électricité de la façon suivante:

**Équation 4**

$$E = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M b_{ij} \cdot (V_j \cdot A_i)$$

où  $A_i = 1$  si le ménage possède l'usage  $i$  et 0 sinon. Pour certains usages, les  $A_i$  peuvent indiquer une unité de mesure ou encore la quantité d'appareils existants dans le ménage. On peut alors estimer par la méthode des moindres carrés les coefficients  $b_{ij}$  ainsi que  $E_0$ .

En pratique, l'objectif de l'analyse conditionnelle est de déterminer des consommations moyennes par usage ainsi que la sensibilité de différentes caractéristiques économiques, techniques ou encore démographiques sur ces consommations. Pour ce faire, nous allons modifier l'

Équation 4 de la manière suivante: Des équations précédentes, nous pouvons déduire le raisonnement présenté à l'équation 5.

**Équation 5**

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=0}^N E_i \cdot A_i \\ &= \sum_{i=0}^N \left[ b_{i0} + \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot V_j \right] \cdot A_i \\ &= \sum_{i=0}^N b_{i0} \cdot A_i + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot V_j \cdot A_i \\ &= \sum_{i=0}^N b_{i0} \cdot A_i + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot [(V_j - \bar{V}_{ij}) \cdot A_i] + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot \bar{V}_{ij} \cdot A_i \\ &= \sum_{i=0}^N b_{i0} \cdot A_i + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot \bar{V}_{ij} \cdot A_i + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot [(V_j - \bar{V}_{ij}) \cdot A_i] \\ &= \sum_{i=0}^N \left( b_{i0} + \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot \bar{V}_{ij} \right) \cdot A_i + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot [(V_j - \bar{V}_{ij}) \cdot A_i] \\ &= \sum_{i=0}^N \bar{E}_i \cdot [A_i] + \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot [(V_j - \bar{V}_{ij}) \cdot A_i] \end{aligned}$$

Nous régressons donc  $E$  en fonction des variables entre  $[\bullet]$ . D'un point de vue mathématique, le coefficient devant la variable "dummy"  $A_i$  représente la consommation moyenne de l'usage  $i$  pour les ménages qui le possèdent. Et c'est cette régression qui nous permet d'obtenir les estimations de consommation pour les divers usages étudiés.

# LA RÉVOLUTION ÉLECTRIQUE EN COURS : PORTRAIT DE L'ÉMERGENCE D'UNE NOUVELLE ARCHITECTURE DANS LES PAYS INDUSTRIALISÉS

Phillip U. Dunsky, *Expertise-conseil P. Dunsky*, Montréal. Courriel : [dunsky@vif.com](mailto:dunsky@vif.com)

---

**Résumé :** L'architecture précise du système électrique à court et moyen terme est loin d'être décidée. À long terme toutefois, elle semble s'orienter clairement vers une configuration nouvelle, basée sur une triade de tendances lourdes : miniaturisation, décentralisation et écologisation de la production d'électricité. Ce texte décrit ces tendances et les forces qui les sous-tendent, soit l'effet combiné des progrès technologiques, de la conscientisation environnementale, de la numérisation de l'économie et de l'ouverture des marchés à la concurrence.

**Mots clefs :** électricité, énergie, énergie renouvelable, gaz à effet de serre, décarbonisation, miniaturisation, environnement, économie, technologie

**Abstract :** In the short and medium terms, the precise architecture of the industrial world's electricity system remains hazy. Yet in the long term, it seems quite clearly headed toward a new configuration, rooted in a triad of solid trends: miniaturization, decentralization and the "greening" of power generation. This text describes and explains these trends and their underlying forces, namely the combined effects of technological progress, growing environmental consciousness, the advent of a digital economy and the opening of markets to competition.

**Key words :** electricity, energy, renewable energy, greenhouse gases, decarbonization, miniaturization, environment, economy, technology

---

*« Si vous ne savez pas où vous allez, alors tous les chemins vous y mèneront. »  
- proverbe*

## Introduction

Les pays industrialisés font face aujourd'hui à un contexte énergétique sans précédent. Bouleversements technologiques se conjuguent avec impératifs environnementaux, restructurations des marchés et transformations économiques pour dessiner, de façon étonnamment cohérente, un portrait énergétique du futur très différent de celui du passé récent. Si cette évolution fut théoriquement perceptible dès les années 1980, alors que quelques penseurs américains et européens commençaient à en tracer les grandes lignes, ce n'est que depuis le milieu des années 1990 qu'elle prit racine chez une masse critique d'experts et de décideurs du monde de l'énergie.

En fait, comme on le verra dans les sections suivantes, la transition en cours dure depuis plus de deux décennies et tourne autour de quatre pôles de changement fondamental dont le renforcement mutuel constitue la clé de voûte :

► **Technologies** — De la construction de grandes centrales lointaines, nos techniques de production évoluent vers la fabrication de petites unités, situées à proximité des consommateurs et ouvrant la voie à la récupération de la chaleur ainsi qu'à l'autoproduction;

► **Marchés** — De systèmes monopolistiques verticalement intégrés et réglementés, nos marchés s'orientent vers l'éclatement vertical, la concurrence dans la production et une réglementation économique ciblée;

► **Environnement** — D'une perspective initiale de la nature comme étant abondante et illimitée, nous sommes devenus davantage sensibilisés à ses limites de production et d'absorption, à notre gaspillage indu de ses ressources et au besoin critique d'accélérer l'écologisation et la décarbonisation de nos économies;

► **Économie** — Les pays industrialisés délaissent tranquillement une économie basée sur l'exploitation brute des ressources naturelles en faveur d'une économie du savoir, axée davantage sur la valeur ajoutée associée à la transmission, l'analyse et l'exploitation rapide de l'information.

La présence simultanée de ces forces multiples semble pousser le secteur énergétique vers une nouvelle architecture qui, lorsque pleinement opérationnelle, offre l'espoir de pouvoir mieux concilier les impératifs environnementaux

avec les besoins énergétiques et économiques des sociétés modernes (figure 1).

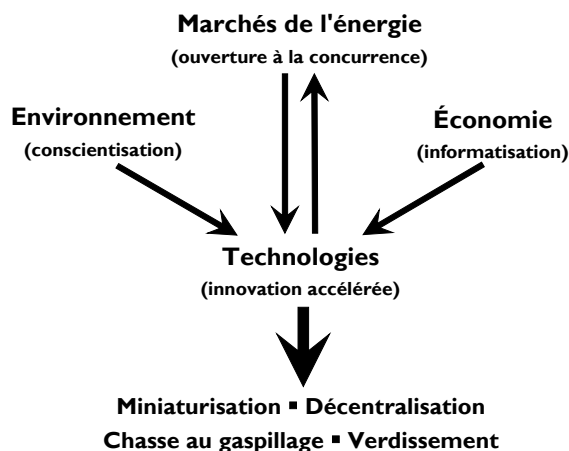


Figure 1. Les principales forces en jeu dans le secteur énergétique pour une nouvelle architecture énergétique

Dans ce texte, nous élaborons sur ces quatre forces incontournables du contexte sans précédent que vit le secteur de l'énergie.

Nous examinons également en quoi le rythme progressif et évolutif du changement en cours mérite, voire requiert d'être accéléré, compte tenu des défis environnementaux auxquels nous sommes confrontés. Enfin, nous faisons un survol des risques et incertitudes qui planent à l'horizon.

Avant tout, ce texte sert à dresser un portrait large des changements en cours et, indirectement, à donner un aperçu tant des défis que des orientations et occasions qui se présentent à l'horizon. Cet aperçu peut ensuite servir d'intrant aux réflexions stratégiques ainsi qu'aux choix politiques, réglementaires, individuels et d'affaires que les multiples acteurs auront à prendre au cours des années à venir.

### Une architecture énergétique en émergence

Pour comprendre la nature et l'envergure de la transformation énergétique en cours, il suffit de regarder – individuellement et collectivement – les principales forces structurantes qui la soutiennent.<sup>1</sup> Le portrait de l'avenir qui en résultera nous aidera par

<sup>1</sup> Il nous incombe de souligner que la forme précise que prendra cette architecture reste à déterminer. Ce sont plutôt ses grandes

lignes – son portrait global – que nous sommes en mesure de dessiner aujourd'hui avec une certaine confiance.

### Technologies : miniaturisation et décentralisation au menu

Après la course initiale aux économies d'échelle, la taille des unités de production d'électricité décroît systématiquement depuis quelques temps. D'ailleurs, cette miniaturisation continue s'accompagnera vraisemblablement d'une décentralisation de la production ainsi que d'une diversification technologique et énergétique sans précédent.

La diversité des technologies qui alimenteront nos besoins en électricité est particulièrement importante. Loin de « la solution » aux problèmes environnementaux de l'énergie, une multitude de solutions émergeront et émergent déjà (voir par exemple le graphique D à la page 8).

En pratique, la miniaturisation est déjà solidement ancrée dans l'industrie énergétique. En effet, une analyse des quelque 13 500 centrales mises en service aux Etats-Unis depuis 1920, réalisée en 2000, démontre l'ampleur du renversement récent de la tendance historique des économies d'échelle (Dunsky, 2000).

En effet, comme on peut le constater sur la figure 2, entre la fin de la première et la fin de la deuxième guerre mondiale, la taille moyenne des centrales états-uniennes a connu une croissance stable et soutenue de l'ordre de 5,5 %/an. La décennie suivante a vu la première chasse aux économies d'échelle : la taille des centrales a cru en moyenne de 17 % annuellement, quadruplant en l'espace de seulement dix ans. Puis, après un court retour au calme, les années 1970 ont signalé la deuxième (et dernière) étape de croissance fulgurante. À la fin de cette décennie, marquée par un appétit sans précédent pour les grandes centrales nucléaires et au charbon (de même qu'hydroélectriques), la taille moyenne des centrales allait décupler par rapport à celles construites 50 ans plus tôt.

lignes – son portrait global – que nous sommes en mesure de dessiner aujourd'hui avec une certaine confiance.

<sup>2</sup> Ici et à travers ce texte, nous abordons uniquement le cas des économies hautement industrialisées. Quant aux économies sous développées ou en transition, certaines adopteront le modèle occidental des dernières décennies (grands projets centralisés appuyés par de grands réseaux de transport), alors que d'autres pourront profiter de la transition en cours pour sauter directement (*leapfrog*) au modèle décentralisé. Cette dernière possibilité est intéressante là où il y a absence de grandes infrastructures énergétiques. L'électrification rurale en Afrique – village par village, souvent par de petits systèmes d'énergie renouvelable – constitue un bon exemple à cet égard.

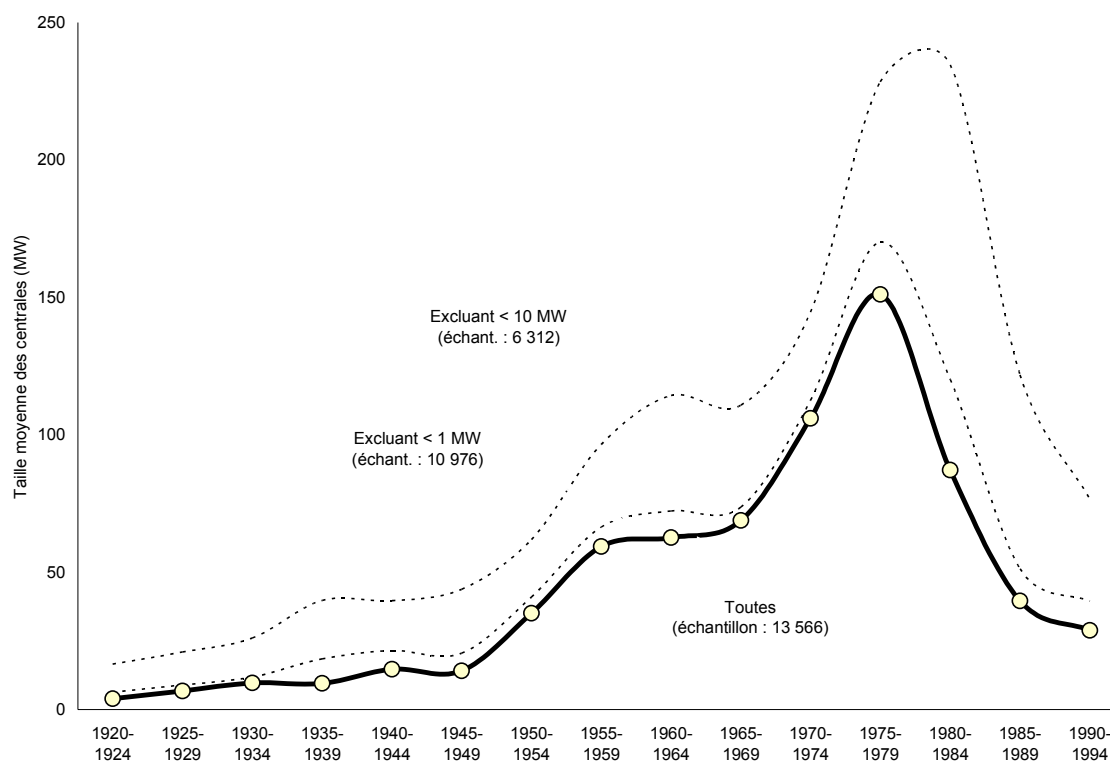


Figure 2. Après les économies d'échelle, la miniaturisation. Source : Dunsky (2000)

Mais les années 1970 allaient également signaler la fin de cette course fulgurante vers des centrales de plus grande envergure. Dans la décennie qui suivit, de nouveaux développements technologiques, principalement du côté des centrales thermiques (les turbines à gaz) mais aussi renouvelables (l'éolienne), couplés à la fin soudaine du rêve nucléaire, allaient renverser tous les gains de taille réalisés depuis un quart de siècle.<sup>1</sup> Si bien qu'au milieu des années 1990, la taille moyenne des centrales est revenue à son plus bas depuis peu après la deuxième guerre mondiale.<sup>2</sup>

Aujourd'hui, l'avènement des piles à hydrogène, des microturbines et d'autres systèmes à petite échelle vient

<sup>1</sup> De façon aussi inattendue qu'ironique, une partie importante de ces succès technologiques (turbines d'aviation et matériaux avancés) doit ses origines à l'investissement massif des Etats-Unis dans les efforts de R-D de l'industrie militaire à l'époque Reagan.

<sup>2</sup> Le renversement des économies d'échelle n'a rien de théorique. En 1995, une comparaison des coûts de l'ensemble des turbines à gaz disponibles sur le marché (variant de 3 à 250 MW chacune) révélait que le bénéfice net maximal provenait d'un modèle de seulement 40 MW. Cette analyse ne tenait pas compte d'un ensemble de plus de 200 bénéfices économiques et environnementaux supplémentaires associés aux technologies de petite taille. *Lovins et al. 2002.*

consacrer ce virage profond.<sup>3</sup>

Comme on sera en mesure de le constater, cette miniaturisation et la décentralisation qui s'en suit trouvent racine – outre les efforts publics en recherche et développement – dans l'ouverture des marchés à la concurrence, les pressions environnementales grandissantes et les transformations économiques en cours.<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Les technologies énergétiques dispersées peuvent être regroupées en trois catégories, soit celles qui agissent sur la demande (consommation efficace, gestion de pointe, stockage, substitution rapide, qualité de l'onde, etc.), sur l'offre (solaire, éolien, biomasse, piles à hydrogène, microturbines, générateurs diesel, etc.) et sur la livraison (régulation du voltage, contrôles, stockage sur le réseau, etc.).

<sup>4</sup> Comme l'indique l'*Electric Power Research Institute (EPRI)* dans sa récente publication *Perspectives on the Future (Borbely et Kreider 2001)*, l'évolution qui attend l'industrie de l'électricité ressemble à maints égards au parcours qu'a déjà connu l'industrie de l'informatique. Dans cette industrie, des grands ordinateurs centraux ont cédé le pas aux ordinateurs personnels de très petite taille, géographiquement dispersés et de haute performance, qui sont connectés ensemble par des réseaux complexes et dynamiques. Avec l'avènement des microturbines, des piles à hydrogène et d'autres techniques décentralisées de production, de stockage et de contrôles



**Marchés : la concurrence dominera**

Il y a fort à parier que les structures électriques de l'avenir feront partie, dans une grande mesure, de l'économie de marché.<sup>5</sup>

En effet, le mouvement vers la concurrence dans la production d'électricité tient beaucoup moins à une question d'idéologie dominante qu'à la nature des technologies de production : les économies d'échelle, qui autrefois pouvaient donner lieu à des monopoles naturels, cèdent le pas aujourd'hui aux économies de gamme et aux techniques de fabrication en ligne, comme on l'a souligné précédemment.<sup>6</sup>

C'est ainsi que les deux dernières décennies ont vu l'ouverture progressive du marché de la *production d'électricité* (le marché de gros). C'est ainsi que l'essentiel de la production d'électricité en Amérique du Nord ne vient plus des monopoles verticalement intégrés d'antan, mais plutôt de producteurs indépendants tels que Cinergy, Calpine, Sempra, Tractebel et autres.

Cette ouverture s'est d'abord produit en deux étapes : (i) par l'obligation faite aux monopoles verticalement intégrés de se transformer en monopsones en faisant appel aux producteurs tiers par le biais d'appels d'offres pour des contrats à long terme; et (ii) par l'arrivée de bourses en temps réel et la construction de centrales marchandes (construites entièrement au risque du promoteur).<sup>7</sup> La troisième et dernière étape de cette ouverture – déjà commencée par ailleurs – est (iii) l'autoproduction à partir d'unités décentralisées.

La décennie passée fut également le théâtre d'efforts en vue d'ouvrir la *vente au détail* aux forces concurrentielles. Malgré de sérieux revers – notamment en Californie et en Ontario – les pays de l'Occident semblent avoir l'intention de poursuivre dans cette voie (quoique avec un regard un peu plus sceptique

---

électroniques avancés, l'industrie de l'électricité est appelée à connaître des changements semblables au cours des décennies à venir.

<sup>5</sup> Ci-après nous parlons uniquement de l'ouverture du marché de la *production*, au gros comme au détail. Soulignons toutefois que si les fonctions de *transport et distribution* d'électricité possèdent pour le moment les qualités de monopoles naturels, elles ne sont pas pour autant entièrement à l'abri des forces concurrentielles. À terme, l'avènement des sources de production décentralisées pourrait remettre en question leur statut monopolistique.

<sup>6</sup> De plus, l'électrification – autre objectif ayant justifié l'octroi de monopoles par le passé – est en pratique achevée dans les pays industrialisés.

<sup>7</sup> Soulignons que cette deuxième étape n'a pas encore été franchie au Québec, où le rythme de restructuration se doit d'être plus lent en raison notamment de l'existence de quelques très grandes centrales lointaines. Ce contexte particulier, ainsi que l'approche patrimoniale à laquelle il se prête, fut abordé pour la première fois dans *Dunsky et Raphals 1997*.

qu'auparavant). Or, malgré les difficultés associées à une telle ouverture des marchés, il existe peu de doutes quant à leur capacité d'ouvrir des marchés *niches* pour de nouveaux produits et services.

Les marchés *niches* – que les monopoles ont tendance à négliger en faveur d'une clientèle « moyenne » – permettent à des producteurs spécialisés d'offrir, grâce à de nouvelles technologies, des produits et services hautement valorisés par une minorité de clients (fiabilité, impact environnemental réduit, etc.), en échange de primes sur les prix de marché. L'ouverture de ces marchés enclenche un cycle d'économies d'échelle et de réduction des coûts qui peuvent conduire éventuellement à la maturité technologique et l'adoption à grande échelle.<sup>8</sup> En ce sens, l'éclatement des marchés – pourtant le *résultat* des innovations technologiques – agit aussi pour renforcer et accélérer ces mêmes innovations.<sup>9</sup>

Par ailleurs, tant le développement de l'internet que des microprocesseurs puissants facilitent le fonctionnement de bourses d'électricité en temps presque réel.<sup>10</sup>

Comme pour tous les changements qui surviendront au cours des années à venir, celui-ci ne se fera pas sans tergiversations, erreurs et remises en question.<sup>11</sup> De plus, la possibilité est

---

<sup>8</sup> Selon Rogers (1992), une telle pénétration du marché évolue typiquement selon une courbe de diffusion en forme de 'S'. Cette courbe est caractérisée par une entrée lente et difficile au marché, suivi d'une croissance rapide et, enfin, d'une stabilisation à des niveaux de pénétration élevés.

<sup>9</sup> Les principaux marchés *niches* à émerger dans le contexte des marchés concurrentiels sont (1) l'énergie verte, (2) la fiabilité électrique et (3) la stabilisation des prix. Les deux premiers sont tributaires des forces décrites dans les deux sections suivantes (conscientisation environnementale et informatisation de l'économie) et conduisent au développement de technologies à la fois vertes et à très petite échelle (pouvant être situées sur ou près des lieux des consommateurs). Le troisième est le résultat de prix qui, de plus en plus, pourront refléter ceux de bourses qui fluctuent à des intervalles aussi courts que cinq minutes. Ce troisième marché niche conduit en partie aux technologies décentralisées, en partie à des outils de gestion de la demande et, enfin, en partie à des outils financiers de gestion du risque.

<sup>10</sup> Les bourses les plus avancées aujourd'hui organisent les échanges à des intervalles de cinq minutes. Certains envisagent de les réduire encore plus.

<sup>11</sup> Le mouvement de déréglementation en Amérique du Nord en est un bon exemple. Après des débuts retentissants (25 États, dont les trois plus importants, ainsi que deux des trois provinces les plus importantes avaient ouvert ou annoncé l'ouverture prochaine de leurs marchés de détail), la crise de la Californie en 2000 a engendré une remise en question générale. En effet, en date de l'automne 2002, six États ont depuis reporté leurs échéances d'ouverture alors que la Californie a effectué un virage de 180° en annulant l'ouverture au détail et en établissant, sur une base temporaire, un grossiste monopolistique d'État. L'échec californien tient toutefois à un

grande que de nombreuses entreprises verticalement intégrées, par intérêt financier ou institutionnel, réussiront à maintenir temporairement leur position dominante en abusant de l'inertie législative. À la longue cependant, le modèle traditionnel de monopoles verticalement intégrés est sans doute appelé à disparaître (au moins dans sa forme la plus connue).<sup>12</sup>

### **Environnement : l'écologisation et la décarbonisation devront s'accélérer**

Globalement, nul doute que la qualité de l'environnement – la santé des écosystèmes, la survie des espèces, la qualité de l'air, de l'eau et des sols, le climat mondial – s'est généralement détériorée depuis la révolution industrielle, et ce, en raison notamment de la croissance économique et démographique ahurissante qui est survenue au cours du siècle dernier.<sup>13</sup> En effet, ces pressions démographiques et économiques ont conduit à une croissance exponentielle de la production de biens et services, qui nécessite à son tour de l'énergie.

En parallèle à cette intensification des besoins énergétiques, nos méthodes de production ont connu, sur le plan environnemental, des progrès constants mais nettement insuffisants compte tenu de l'accroissement de la demande.

Deux portraits permettent de constater l'ampleur du progrès réalisé de même que le chemin important qu'il reste à parcourir. Il s'agit de (1) une mesure quantitative de l'intensité en carbone du système énergétique mondial et (2) un regard qualitatif sur la performance environnementale du secteur de l'électricité en particulier.

La décarbonisation du système énergétique mondial est présentée, dans un premier temps, dans l'encadré intérieur de la figure 3, en termes de tonnes de carbone par tonne équivalent pétrole (tC/tép). Ce graphique illustre les progrès réalisés jusqu'ici par la substitution de formes primaires d'énergie. En effet, sur une période de seulement 100 ans, le monde a largement réussi à remplacer, comme source énergétique do-

minante, le bois (1,25 tC/tép) par le charbon (1,08 tC/tép), puis le charbon par le pétrole (0,84 tC/tép). Par ailleurs, au cours des vingt dernières années, l'Occident en est venu à privilégier nettement le recours au gaz naturel (0,64 tC/tép). Cette évolution sera achevée lorsque les systèmes d'hydrogène pur domineront (0,00 tC/tép, lorsque tiré de sources renouvelables).

Dans un deuxième temps, le portrait global des émissions absolues est présenté à la figure 3. Si les réductions de l'intensité en carbone de nos sources d'énergie, de l'ordre de 0,34% par an en moyenne, peuvent paraître importantes, ce graphique permet de comprendre qu'elles sont toutefois masquées par la croissance encore plus spectaculaire (environ 2,73%/an) de la *quantité* d'énergie que nous consommons. C'est ainsi qu'en dépit des progrès réalisés, les émissions de carbone dans l'atmosphère planétaire ont néanmoins augmenté de façon significative (soit par un facteur de plus de 18), au point, selon le GIEC (2001), de modifier l'équilibre climatique mondial.

Le défi aujourd'hui consiste donc à *accélérer* deux tendances déjà en cours : la désintensification énergétique de l'économie (par une meilleure efficacité énergétique) et la décarbonisation des sources énergétiques (par le recours accru aux sources « vertes »). Quant à la première, elle a profité de gains significatifs au cours des années 1970 mais son rythme, à environ 1 % par année, s'est depuis ralenti considérablement (Schipper 2002). Quant à la deuxième, son rythme de progrès, présenté à l'encadré intérieur de la figure 3, sensiblement trop lent pour contrebalancer la croissance des besoins énergétiques.

Par ailleurs, le domaine de l'électricité – microcosme de plus en plus important du système énergétique mondial – offre, lui aussi, un portrait clair du chemin parcouru et qu'il reste à parcourir. Tout comme dans le cadre des sources d'énergie primaire, la production d'électricité a, jusqu'ici, réalisé des gains environnementaux à un rythme constant mais modéré.

---

ensemble d'erreurs fondamentales et bien documentées dans la façon dont le marché fut ouvert, et la plupart des analystes croient que la situation actuelle n'est qu'une pause temporaire.

<sup>12</sup> Soulignons par ailleurs que la différenciation des produits en fonction des marchés niches peut exister même en l'absence de marchés libres dans la vente au détail. En effet, les régulateurs peuvent chercher à reproduire cet effet bénéfique des marchés concurrentiels en s'assurant que les monopoles sous leur compétence offrent une panoplie d'options tarifaires au lieu d'une seule. L'État de l'Oregon – où les consommateurs résidentiels demeurent captifs mais peuvent néanmoins choisir parmi six options tarifaires (un tarif standard, trois tarifs « verts » et deux tarifs différenciés dans le temps) – offre à cet égard un bon exemple à suivre. *Centre Hélios 2002*.

<sup>13</sup> En l'espace d'à peine sept décennies (1930-1999), l'humanité a ajouté quelque quatre milliards de personnes à la charge de la planète, soit deux fois plus que la population que nous avons bâtie au cours des quelques millions d'années précédentes. *Haupt et Kane 2000*.

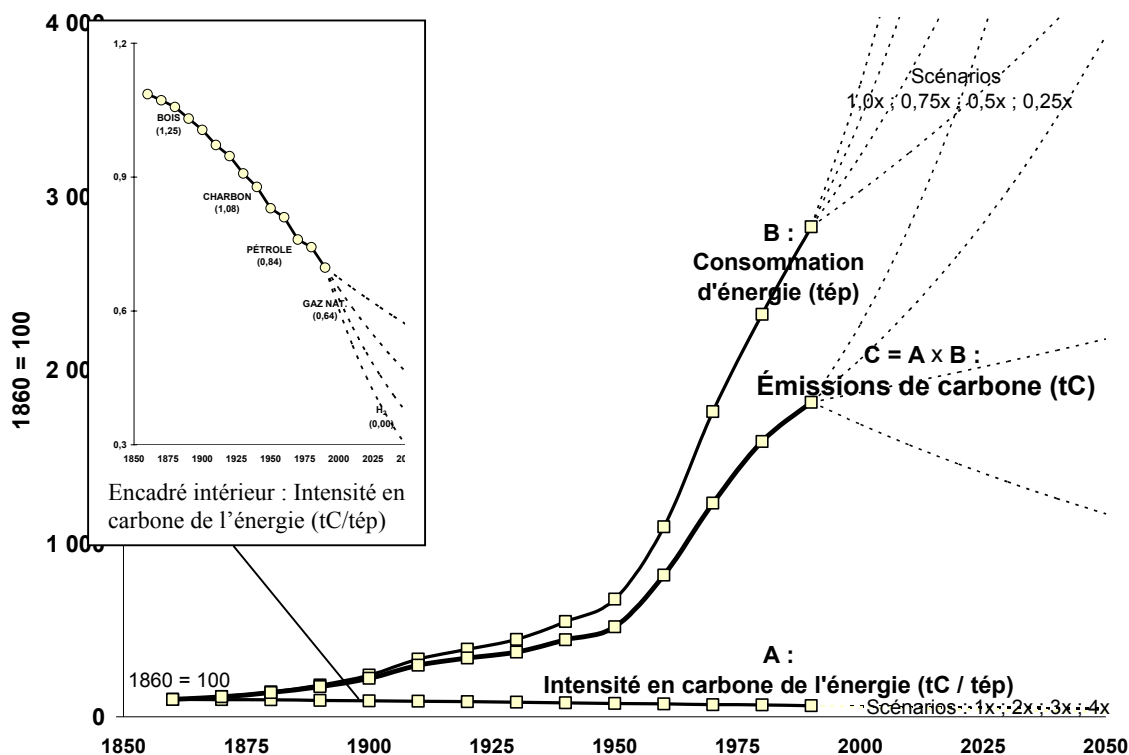


Figure 3. La décarbonisation relative et les émissions absolues. Sources : Grubler (1998) et Nakićenović (1997).

Comme l'illustre la figure 4, l'électrification des sociétés s'est réalisée, historiquement, sur deux voies parallèles : celle de l'énergie thermique « classique » et celle de l'hydroélectricité. Dans les deux cas, le premier siècle de développement a permis des gains environnementaux progressifs mais modérés, accompagnés du même coup de la croissance plus ou moins progressive de la taille des centrales.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Notes explicatives au graphique : La superficie des bulles indique la taille relative des technologies dominantes. Afin d'assurer leur visibilité, nous avons gonflé les bulles « solaire-PV », « microturbinés » et « piles à hydrogène ». La bulle « biogaz » réfère à la réutilisation de l'énergie (e.g. méthane) provenant notamment de rejets agricoles et municipaux. La bulle « Autres renouvel. » réfère à la production d'énergie à partir de sources naturelles telles que la chaleur terrestre, les vagues et les marées. La bulle « Surprise » réfère aux nouvelles technologies et innovations qui pourront être développées à l'avenir (par exemple, la fusion nucléaire, le thermo-photovoltaïque, etc.). L'échelle écologique est une approximation. Les centrales thermiques (classiques et avancées) sont classées principalement selon leur efficacité de combustion (nette), ajustée pour d'autres facteurs de performance écologique. Le classement des centrales nucléaires, dont les impacts environnementaux sont incomparables à ceux des centrales thermiques, est un jugement

- ▶ En ce qui concerne les centrales thermiques classiques, elles sont devenues à la fois moins polluantes grâce à des technologies de contrôle à la cheminée et, surtout, plus performantes en termes d'efficacité de la combustion.<sup>2</sup>
- ▶ En ce qui concerne les projets hydroélectriques, il est sensiblement plus difficile de généraliser, compte tenu de la spécificité de chaque projet. Néanmoins, les efforts de protection des poissons et des habitats, notamment, ont certainement connu des progrès au cours des dernières décennies.

Dans les deux cas – thermique classique et hydraulique – les résultats demeurent toutefois décevants dans une perspective écologique (quoiqu'à des degrés différents). Or, depuis le début des années 1990, une deuxième phase de progrès – sensiblement plus rapide que la précédente – se pointe à l'horizon, et semble lier deux phénomènes : la chute des

subjectif de l'auteur. Il en va de même pour les centrales hydroélectriques, dont les impacts sont en plus largement dépendants du site.

<sup>2</sup> Concrètement, l'efficacité au cours des premières années de l'électrification (1882-1920) a doublé tous les 13 ans environ, passant de quelque 2,5 % en 1882 (centrale Pearl d'Edison) à quelque 20 % vers l'an 1920. Par la suite, il faudra attendre quelque cinquante ans avant de voir un autre doublement de l'efficacité.

économies d'échelle (voir la sous-section « *Technologies : miniaturisation et décentralisation au menu* ») et l'avènement de technologies véritablement « vertes » (discuté ci-après).

Cette « voie verte » de l'électrification est le résultat – en plus des phénomènes technologiques et économiques discutés précédemment – d'une conscientisation environnementale grandissante survenue depuis les années 1960 et qui se concrétise aujourd'hui par l'entrée en force prochaine du Protocole de Kyoto.<sup>3</sup>

Le premier pas sur cette nouvelle voie énergétique – celle du thermique avancé – s'est d'ailleurs clairement établi au cours des quinze dernières années avec le recours, comme technologie de production dominante à la marge, des turbines à gaz alimentées au gaz naturel et opérant en cycle combiné (TAGCC)<sup>4</sup>, voire parfois en cogénération.<sup>5</sup>

Mais c'est le deuxième pas qui est tant attendu et qui semble se présenter aujourd'hui : celui des technologies avancées d'énergie « verte ».

Les sources d'énergie verte sont nombreuses. D'une part, elles comprennent des ressources renouvelables naturelles telles que le vent, le soleil, la chaleur terrestre, la biomasse, les vagues, les marées et dans une certaine mesure les rivières.<sup>6</sup> D'autre part, elles comprennent les diverses techniques de recyclage de l'énergie perdue dans les rejets industriels, agricoles et

municipaux.<sup>7</sup>

Ultimement, les piles à hydrogène seront vraisemblablement la technologie dominante. De telles piles convertissent l'hydrogène et l'oxygène de l'air en électricité à partir d'un processus électrochimique, donc sans combustion.<sup>8</sup> En agissant notamment comme outil de stockage pour l'énergie électrique, les piles à hydrogène permettront non seulement d'accélérer la dépendance envers des sources souvent intermittentes, mais aussi à transférer ces progrès au domaine du transport des personnes et des marchandises.<sup>9</sup>

### **Économie : l'informatisation au cœur de la croissance**

L'économie occidentale est plus que jamais dépendante de la transmission, l'analyse et l'exploitation de la matière grise que sont l'information et le savoir humain. L'avènement de cette « économie numérique » affecte le secteur de l'énergie de plusieurs façons.

D'abord, elle permet d'accélérer le développement de technologies de consommation plus efficaces, réduisant du coup la croissance de la demande.<sup>10</sup> Il faut souligner qu'une telle amélioration de l'intensité énergétique de l'économie est le signe d'une économie plus productive.

<sup>3</sup> Cette conscientisation – qui a pris son élan en 1962 avec la publication du *bestseller* « *Silent Spring* » de Rachel Carson – s'est traduite au départ par des mouvements environnementaux et de citoyens préoccupés notamment par la qualité de l'air qu'ils respiraient ainsi que par une volonté de protéger la nature pour elle-même (valeur d'existence). L'entrée en vigueur prochaine du Protocole de Kyoto – préoccupé par l'équilibre climatique mondial – consacrera son ascension, en l'espace de quarante ans, comme une force internationale de taille.

<sup>4</sup> Il importe de souligner que si les TAGCC *sans* cogénération ne représentent aucunement un progrès pour les régions ayant misé sur l'hydraulique, ils constituent un gain significatif pour ceux ayant privilégié par le passé les centrales au charbon.

<sup>5</sup> Les nouvelles centrales TAGCC affichent aujourd'hui un taux d'efficacité de l'ordre de 50 % (en tenant compte des pertes de transport et distribution), alors qu'en cogénération, les turbines à gaz ou les piles à hydrogène peuvent atteindre une efficacité globale de 75 % à 90 %. Ces dernières représentent une efficacité énergétique plus de 30 fois supérieure à la première centrale d'Edison, tout en étant revenues à une taille semblable.

<sup>6</sup> L'énergie hydroélectrique diffère des autres sources renouvelables en ce qu'elle génère d'importants impacts environnementaux non atmosphériques et en raison de la disponibilité plus limitée et des conflits d'usage plus importants associés à la ressource. Néanmoins, certains projets peuvent générer des impacts négligeables et pourraient bien être qualifiés de « verts » (voir à ce sujet [www.lowimpacthydro.org](http://www.lowimpacthydro.org)).

<sup>7</sup> La récupération du méthane constitue une occasion de verdissement souvent négligée. Par exemple, le méthane provenant des déjections animales (lisiers de porc, etc.) peut être récupéré à des fins de chauffage direct, de production d'électricité ou d'insertion au réseau de gaz naturel (après traitement). Il en va de même pour les sites d'enfouissement, les égouts municipaux et d'autres sources d'énergie gaspillée. Au Canada, les Fonds municipaux verts, administrés par la Fédération canadienne des municipalités, travaille à encourager la récupération et l'utilisation de ces sources d'énergie (voir [www.fcm.ca](http://www.fcm.ca)).

<sup>8</sup> L'hydrogène lui-même pourra être obtenu de plusieurs sources : les hydrocarbures (le gaz naturel, le pétrole et le charbon), la biomasse (par gazéification) ou l'eau (par l'électrolyse, un processus qui requiert de l'électricité, que ce soit de source nouvelle ou conventionnelle. [www.hydrogen.org](http://www.hydrogen.org)).

<sup>9</sup> En effet, il est déjà possible d'envisager l'intégration éventuelle des marchés d'énergie stationnaire (résidentiel et commercial) et des transports, notamment grâce à la multifonctionnalité des piles à hydrogène. Dans l'État de la Californie, les instances para gouvernementales responsables viennent de lancer les premières études à ce sujet. *Kempton et al. 2001*.

<sup>10</sup> La croissance annuelle des besoins énergétiques nord-américains au cours de la dernière décennie – une période de bas prix et de forte croissance économique – ne fut qu'une fraction (environ le quart) de la croissance de la demande vécue au cours des années 1960 et 1970. La désintensification énergétique de l'économie continue d'ailleurs de se poursuivre, quoiqu'à un rythme moins fort qu'auparavant.

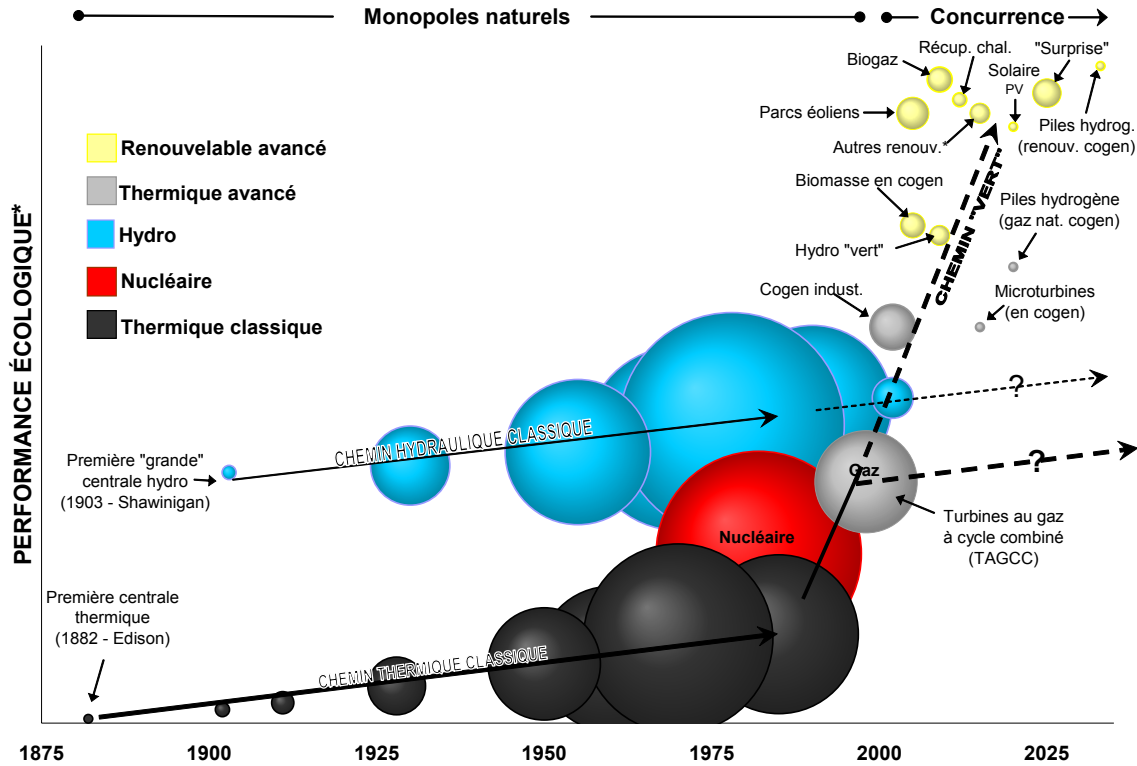


Figure 4. L'écologisation de la production d'électricité (voir le note de bas de page n° 16 pour explications)

Ensuite, elle facilite la transition vers un marché électrique pleinement concurrentiel, et ce, par le truchement de bourses d'échange transparentes et accessibles et par le déploiement de compteurs en temps réel.<sup>1</sup> Ces changements permettront de réduire le pouvoir de marché concentré chez une poignée de

producteurs en rendant le marché plus dynamique et robuste.<sup>2</sup>

Enfin (voire surtout), les activités au cœur d'une économie numérique (à savoir principalement les communications électroniques, les transactions financières et la fabrication de micro et nanotechnologies) requièrent une fiabilité et une qualité électriques sans précédent, tel que l'indique le tableau 1.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Les compteurs en temps réel facilitent deux éléments clé de tout marché concurrentiel fonctionnel, à savoir (1) la tarification marginale et (2) la transparence des prix. Quant au premier, les compteurs en temps réels permettent aux distributeurs de varier leurs tarifs en temps réels en fonction du prix d'achat sur le marché spot (qui varie d'heure en heure). Une telle tarification, qui pourrait s'avérer intéressante pour certaines catégories de consommateurs, permet ensuite à ces derniers d'ajuster leur consommation en conséquence. Quant au deuxième, ils permettent aux consommateurs (c'est-à-dire à la demande) de participer au marché (de vendre leurs réductions de consommation aux bourses d'électricité) sur le même pied que les fournisseurs. Ils facilitent également la participation éventuelle des auto-producteurs – autant les cogénérateurs industriels que les résidences propriétaires de panneaux solaires – au même titre que les propriétaires de grandes centrales. À cet effet d'ailleurs, le régulateur britannique des marchés électriques et gaziers (OFGEM) prévoit l'installation de 1 à 3 millions de systèmes résidentiels de cogénération à l'horizon 2010, présentant des défis sans précédent pour l'opération dynamique des réseaux. *McCarthy 2002*.

<sup>2</sup> Le pouvoir de marché fut le principal responsable de la crise californienne de 2000, qui a rapidement dégénéré en pannes rotatives et prix de gros quelque 1000 % plus élevés que la norme. Depuis, la *Federal Energy Regulatory Commission (FERC)* étatsunienne semble avoir compris l'importance des unités décentralisées pour le fonctionnement des marchés concurrentiels d'électricité, comme en témoigne ses plus récentes propositions.

<sup>3</sup> À titre d'exemple, la firme Hewlett Packard (HP) estime les dommages associés à une panne d'électricité de 15 minutes dans une de ses usines de fabrication de puces microprocesseurs à quelque 30 M\$US, soit la moitié de la facture énergétique annuelle d'une telle usine. Aux Etats-Unis, les pannes de courant coûtent aujourd'hui entre 12 et 26 M\$US par an (*Rifkin 2002*). Ces montants illustrent l'ampleur du marché potentiel pour des technologies moins vulnérables, principalement situées chez le client.

Type d'entreprise	Coût approximatif (\$CAN/hre)
Petite entreprise conventionnelle	500 \$
Communication cellulaire	65 500 \$
Billetterie téléphonique (générale)	115 000 \$
Réservation de billets d'avion (système informatisé)	144 000 \$
Transactions par carte de crédit	4 120 000 \$
Transactions par courtiers de placement	10 350 000 \$
Usines de fabrication de puces microprocesseurs	50 000 000 \$

Tableau 1. Valeur de la fiabilité jugé selon le coût typique d'une panne. Sources : Weinberg (2001) et Rifkin (2002)

Ces besoins accrus en fiabilité mettent en évidence l'une des faiblesses les plus importantes du système actuel, caractérisé non seulement par ses grandes centrales mais aussi par leur éloignement des centres de consommation.<sup>4</sup> Ces caractéristiques dénotent une vulnérabilité d'une part, aux dérèglements climatiques (lignes de transport) et d'autre part, au terrorisme physique (attaque de centrales nucléaires) ou économique (attaque de lignes de transport ou sabotage virtuel de l'opération de centrales électriques).<sup>5</sup>

Face à la vulnérabilité du modèle centralisé existant, les besoins en fiabilité d'une économie numérique s'exercent – tout comme les marchés concurrentiels et les pressions environnementales – à la faveur des énergies décentralisées, qui permettent aux entreprises concernées de se prémunir contre les problèmes de qualité de l'onde et d'interruptions coûteuses du service électrique.

Enfin, si les besoins en fiabilité associés à l'informatisation de l'économie constituent l'un des facteurs de décentralisation et de miniaturisation technologiques, soulignons que tout porte à

<sup>4</sup> En Amérique du Nord, le problème des besoins accrus en fiabilité est communément appelé le « problème des 7 neufs ». En gros, les réseaux d'électricité sont conçus pour offrir une fiabilité de 99,99% alors que la nouvelle économie aurait éventuellement besoin d'une fiabilité de 99,99999%. En pratique, les technologies les plus avancées disponibles aujourd'hui sur le marché visent à offrir une fiabilité dite de 6 neufs (99,9999%).

<sup>5</sup> Quelques exemples : *Dérèglements climatiques* – La tempête de verglas de 1998 constitue l'exemple parfait de la vulnérabilité des réseaux étendus aux catastrophes naturelles. *Terrorisme physique* – Dans sa planification des événements tragiques du 11 septembre 2001, le réseau *Al Qaeda* avait identifié, outre le *World Trade Center*, le *Pentagone* et la Maison Blanche, des centrales nucléaires états-uniennes comme cibles prioritaires. *Terrorisme économique* – Richard A. Clarke, l'ancien responsable des efforts contre le cyber-terrorisme au sein de la Maison blanche américaine, parle de l'avènement d'un « Pearl Harbor électronique » aux conséquences autant sinon plus désastreuses.

croire que ce changement fondamental s'intensifiera au sein des économies occidentales au cours des prochaines décennies.<sup>6</sup>

### Le défi de la transition

*Vue d'ensemble : des facteurs qui se renforcent*

À elles seules, ni les modifications technologiques, ni la « déréglementation » des marchés, ni la conscientisation environnementale, ni même l'avènement d'une économie informatisée n'expliquent le changement de paradigme en cours dans le monde de l'énergie. C'est plutôt la conjugaison simultanée de toutes ces facettes du milieu – tant le *hardware* technologique que l'environnement économique et social dans lequel il fonctionne – qui obligent à une remise en cause de la façon traditionnelle de faire.

En effet, les préoccupations environnementales, tant locales que globales, créent une pression en faveur de technologies plus écologiques, y compris les unités décentralisées qui maximisent l'efficacité de combustion en permettant la récupération de la chaleur. De même, l'avènement d'une économie informatisée exige une fiabilité accrue, notamment par une décentralisation des sources énergétiques. Enfin, la miniaturisation technologique qui résulte de ces forces conduit, elle, à une ouverture des marchés de l'électricité à la concurrence ; et c'est cette ouverture des marchés qui, en ouvrant les marchés *niches*, facilite à son tour le financement de l'innovation et le développement accéléré des technologies pouvant répondre aux nouvelles exigences économiques et environnementales.

La puissance de ces forces est telle qu'il est difficile d'envisager, à *long terme*, un avenir très différent. D'ailleurs, la croissance fulgurante des énergies « vertes » au cours de la décennie passée peut servir d'indicateur aux opportunités qui se présentent toujours à l'horizon (voir à cet effet la figure 5).

Néanmoins, d'autres forces peuvent, en définitive, venir retarder son avènement.

<sup>6</sup> Une telle intensification viendra dans la mesure où l'architecture économique mondiale continue d'évoluer vers le libre échange transnational. En effet, l'intégration économique mondiale favorisera (non sans maintenir, voire accentuer des inégalités intra- et internationales) le transfert des secteurs économiques à faible intensité en information vers les pays possédant la main d'œuvre la moins éduquée, et inversement chez les pays de l'Occident.

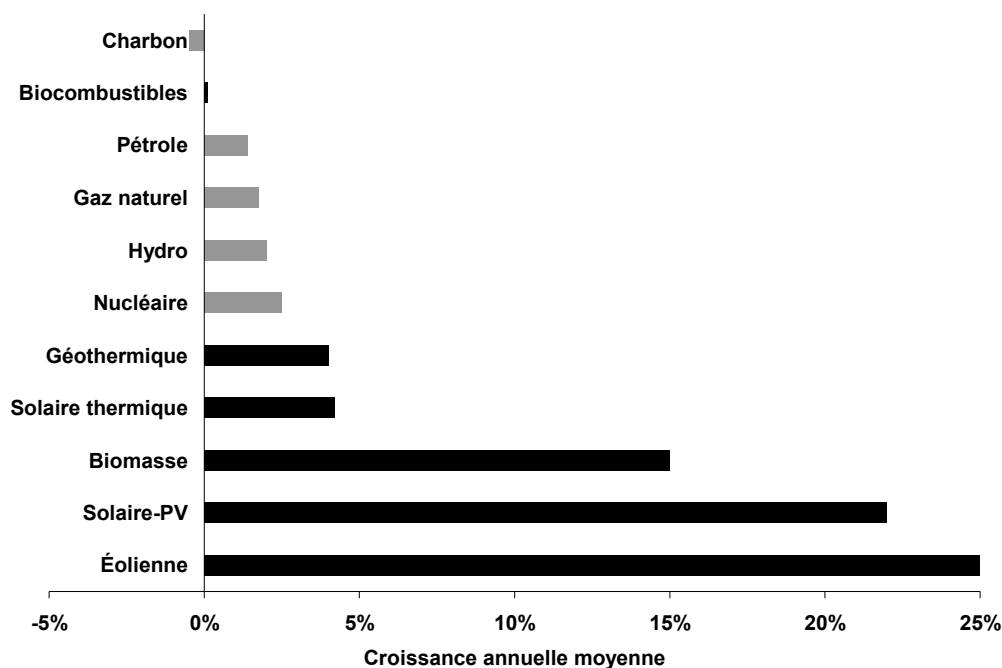


Figure 5. Croissance des ventes mondiales par source d'énergie. Source : Shell (2001).

### Obstacles sur le chemin

Les risques de dérapage à court et moyen terme sont nombreux et non négligeables.

Sur le plan technologique, les monopoles verticalement intégrés pourraient essayer et réussir à bloquer les modifications réglementaires requises pour faciliter la décentralisation de la production.<sup>1</sup> De plus, des sources énergétiques aujourd'hui mal perçues et en déclin (charbon, nucléaire) pourraient – au travers de nouvelles technologies d'exploitation – renaître en tant qu'options privilégiées.

Sur le plan des marchés de l'énergie, l'ouverture continue des marchés de détail fait face à des risques de déraillement, surtout dans la mesure où une « deuxième Californie » se produirait. Un tel déraillement pourrait freiner l'innovation qui accompagnerait l'ouverture des marchés *niches*.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> De telles modifications comprennent notamment l'adoption de normes simplifiées et non discriminatoires – destinées aux autoproducteurs s'alimentant de technologies énergétiques « vertes » – leur permettant de se brancher aux réseaux de distribution et d'obtenir crédit (soit directement, soit en faisant tourner le compteur à rebours) pour la vente au réseau de leur surplus de production. De telles normes existent avec plus ou moins de rigueur dans la plupart des États américains et dans un grand nombre de pays européens.

<sup>2</sup> Cette reconnaissance des bénéfices en termes d'innovation technologique associés aux marchés concurrentiels ne doit pas être confondue avec une appréciation globale de l'ouverture des

Sur le plan environnemental, les acteurs qui dominent les marchés énergétiques actuels (en particulier ceux dont le produit est intensif en carbone) pourraient parvenir à diminuer ou à reporter le renforcement des exigences environnementales et notamment celles visant les émissions de gaz à effet de serre (GES).<sup>3</sup> De plus, il existe un risque que les plans de mise en œuvre des engagements de réduction des GES comptent sur les mesures dont, ou bien les bénéfices sont strictement limités au CO<sub>2</sub> (i.e. qui ne créent pas de co-bénéfices tels l'assainissement de l'air), ou bien qui se font au dépens d'autres préoccupations environnementales (e.g. l'harnachement des rivières). Cette question des co-bénéfices et des co-coûts des mesures devrait occuper une place importante dans les débats à suivre sur la mise en œuvre des engagements du Protocole, au Canada comme ailleurs.

marchés de détail, dont les effets nets sont aussi complexes que variables selon la région en question. Par ailleurs, nous avons souligné précédemment la possibilité pour des régulateurs de reproduire ces bénéfices dans le cadre de marchés monopolistiques réglementés (voir note 12).

<sup>3</sup> À brève échéance, la plus grande préoccupation concerne la ratification, la mise en vigueur et le respect des cibles de la première période de réductions (2008-2012) prévues au Protocole de Kyoto. À moyen terme, on pense aux négociations à venir qui détermineront les cibles de la deuxième période de réductions (post-2012) du protocole.

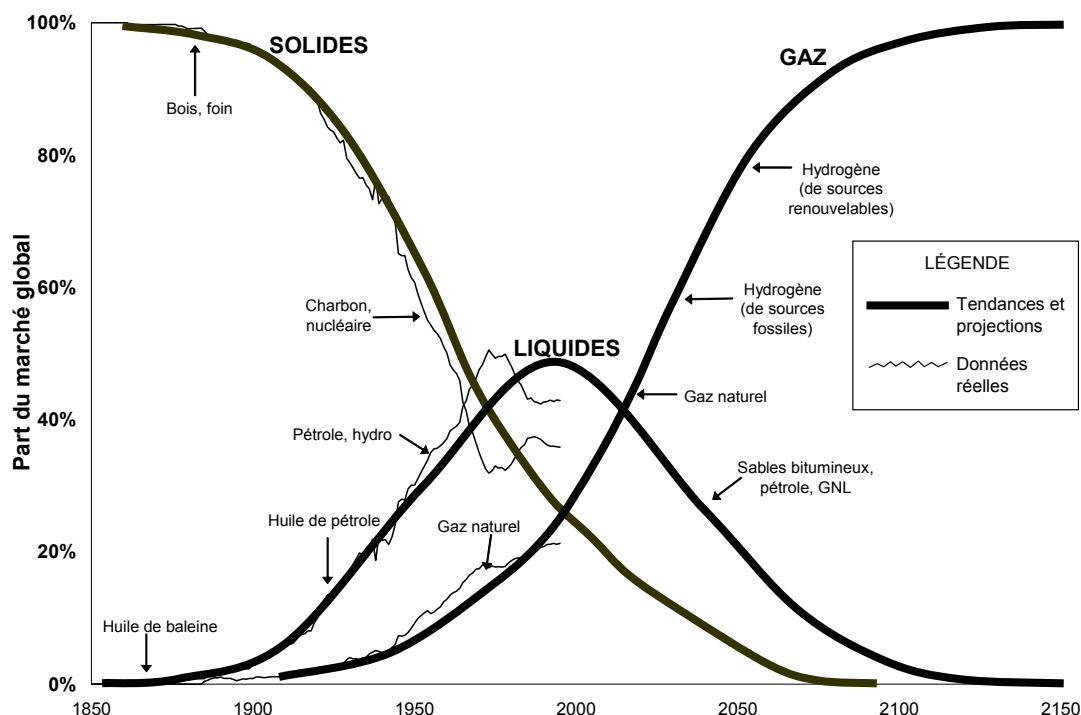


Figure 6. La transition à l'âge de l'hydrogène (1850-2150). Sources : tendances – Hefner (2002) ; données brutes – Grübler (1998).

Enfin, sur le plan économique, un ralentissement ou une récession pan-occidentale d'envergure pourrait réduire de façon draconienne le capital-risque disponible aux fins de la RDD&C technologique, reportant ainsi le développement et la commercialisation de technologies prometteuses.<sup>1</sup>

### Conclusion

L'architecture précise du système énergétique à court et moyen terme est loin d'être décidée. Mais au-delà des revers temporaires potentiels, à long terme elle semble être décidément appelée à changer et ce, dans le sens décrit dans ce texte : miniaturisation, décentralisation et écologisation de la production d'électricité grâce à l'effet combiné des progrès technologiques, de la conscientisation environnementale, de la numérisation de l'économie et de l'ouverture des marchés.

La solidité de cette tendance à long terme est d'ailleurs bien illustrée à la figure 6. Selon l'auteur initial de ce graphique,

<sup>1</sup> Entre 1995 et 2000, le capital-risque affecté aux technologies énergétiques décentralisées a augmenté de près de 2 700 %, constituant un moteur puissant de la miniaturisation et du verdissement technologiques en cours (Hydro-Québec, par sa filiale HQ-Capitech, fait d'ailleurs partie de ceux ayant investi dans ce secteur). Depuis, de tels investissements ont connu une chute importante.

président d'une entreprise états-unienne de forage de gaz naturel, le caractère fondamental du changement tiendrait à la nature des sources énergétiques que nous utilisons. Ainsi, de sources solides (bois, charbon), nous évoluons vers le recours aux gaz (gaz naturel, hydrogène), en passant par les liquides (pétrole).

Cette évolution – de même que l'électrification accrue qui l'accompagne – dénote des gains scientifiques notables ayant conduit à une dématérialisation intense de l'économie mondiale, survenue depuis la révolution industrielle.<sup>2</sup> Cette dématérialisation – un symbole clair de gains de productivité économique – est non seulement porteuse d'espoir sur le plan environnemental, mais elle constitue une condition *sine qua non* de la viabilité des économies à long terme.

En somme, c'est au défi d'une transition sans précédent que le secteur de l'énergie est aujourd'hui convié.<sup>3</sup> Notre réponse –

<sup>2</sup> Si l'échéancier précis des changements attendus peut être sujet à débat (le rythme de changement présenté au Graphique F est sensiblement plus rapide que celui prévu par d'autres institutions énergétiques), il existe toutefois peu de débat quant aux tendances profondes qui sont présentées.

<sup>3</sup> L'intellectuel Jeremy Rifkin évoque cette transition comme étant « la prochaine grande révolution technologique, commerciale et sociale de l'histoire ». Rifkin 2002.



celle des gouvernements comme des régulateurs, des entreprises et de la société civile – déterminera non pas si, mais comment et selon quelle échéance elle sera achevée.

Londres, 14 juin.

Weinberg, Carl J. (2001). "Keeping the Lights On – Sustainable Scenarios for the Future". Présentation devant le *Royal Institute of International Affairs*, 15 mars.

## Bibliographie

- AIÉ-OCDE (2002). *Toward Solutions – Sustainable Development in the Energy Sector*. Agence internationale de l'énergie, Organisation de coopération et de développement économique.
- Borbely, Anne-Marie et J. F. Kreider, éd. (2001). *Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*. Washington, D.C.: CRC Press.
- Centre Hélios (2002). *Relevé des expériences et réflexions visant à concilier la tarification et la conservation d'énergie*.
- Dunsky, Phillip et P. Raphals (1997). "Challenges for Effective Competition in Large Hydro-Dominated Markets – The Case of Québec", *Deregulation of Electric Utilities*, Norwell, Mass et Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998, 101-117. *Topics in Regulatory Economics and Policy*, vol. 28.
- Dunsky, Phillip (2000). "1920-1995 and Beyond: Trending Downward", *Cogeneration and On-Site Power Production*, James and James Publishers, nov.-déc. 2000, 29-32. Disponible à [www.centrehelios.org](http://www.centrehelios.org).
- EIA (2000). *The Changing Structure of the Electric Power Industry 2000: An Update*. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration.
- EPRI (1999). *Electricity Technology Roadmap, 1999 Summary and Synthesis*. Palo Alto, CA : Electric Power Research Institute.
- GIEC (2001). *Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptations et vulnérabilité*. Rapport du Groupe de travail II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, G.-B. : Cambridge University Press.
- Grübler, Arnulf (1998). *Technology and Global Change*. Cambridge, G.-B. : Cambridge University Press.
- Haupt, Arthur et T. T. Kane (2000). *Population Reference Bureau's Population Handbook (4<sup>th</sup> International Edition)*. Washington: Population Reference Bureau.
- Hirsh, Richard et B. Finn (2001). *Powering The Past: A Look Back*. Washington : Smithsonian Institution National Museum of American History. Disponible à [www.americanhistory.si.edu/csr/powering/thepast.htm](http://www.americanhistory.si.edu/csr/powering/thepast.htm).
- Hefner, Robert A. III (2002). *The Age of Energy Gases – In the New Millennium*. Oklahoma City: The GHG Company.
- Kempton, Willett, J. Tomić, S. Letendre, A. Brooks, T. Lipman (2001). *Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California*. Davis, CA: Institute of Transportation Studies, University of California.
- Lovins, Amory B., E.K. Datta, T. Feiler, K.R. Rábago, J.N. Swisher, A. Lehmann et K. Wicker (2002). *Small Is Profitable – The Hidden Economic Benefits of Making Electrical Resources the Right Size*. Snowmass, Colorado : Rocky Mountain Institute.
- McCarthy (2002). "Renewable, CHP and Electricity Distribution Networks: Challenges for the Future". Texte de l'allocation du directeur-général du *Office of Gas and Electricity Markets* de la Grande-Bretagne. 10 septembre 2002. Disponible à [www.ofgem.gov.uk](http://www.ofgem.gov.uk).
- Nakićenović, Nebojša (1997). "Freeing Energy from Carbon". Dans *Technological Trajectories and the Human Environment*, Washington, D.C.: National Academy Press, 74-88.
- Rifkin, Jeremy (2002). *The Hydrogen Economy*. New York : Tarcher/Putnam.
- Rogers, E. (1992). *Diffusion of Innovations*. Cité dans Wiser, Bolinger, Holt et Sweezy, *Forecasting the Growth of Green Power Markets in the United States*, 2001. Golden, CO: U.S. National Renewable Energy Laboratory.
- Schipper, Lee (2002). *What Do We Mean by Reducing Energy Intensity?* Acétates d'une présentation au World Resources Institute.
- Shell (2001). "Positioning for Growth – Business Presentations to Investment Analysts – Chemicals and Renewables". Royal Dutch / Shell Group,

# MODÈLE D'ACCRÉTION DE GLACE SUR UN OBJET BIDIMENSIONNEL FIXE APPLIQUABLE AUX PALES D'ÉOLIENNES

Guy Fortin\*, Adrian Ilincat†, Jean-Louis Laforte‡,

\*Stagiaire postdoctoral au département de mathématiques, de génie et d'informatique et chercheur au Groupe éolien, [Université](http://www.universite-quebec.ca) du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski, C.P. 3300, Québec, G5L 3A1, courriel : [guy\\_fortin@uqar.qc.ca](mailto:guy_fortin@uqar.qc.ca),

†Professeur, au département de mathématiques, de génie et d'informatique et chercheur au Groupe éolien, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, C.P. 3300, Rimouski, Québec, G5L 3A1, courriel : [adrian\\_ilinca@uqar.qc.ca](mailto:adrian_ilinca@uqar.qc.ca)

‡Professeur émérite au département des sciences appliquées et chercheur au Laboratoire international des matériaux anti-givre, Université du Québec à Chicoutimi, 555 boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada, G7H 2B1, courriel : [jean-louis\\_laforte@uqac.ca](mailto:jean-louis_laforte@uqac.ca)

---

**Résumé :** Le LIMA (Laboratoire International des Matériaux Antigivre) en collaboration avec le CIRA (Italian Aerospace Research Centre) a développé un logiciel simulant l'accrétion de la glace en régime sec et humide sur un objet bidimensionnel fixe. Le modèle thermodynamique de l'accrétion de glace est similaire aux modèles existants, LEWICE aux États Unis, TRAJICE en Grande Bretagne, ONERA en France ou CANICE au Canada, où les corrélations empiriques ont été remplacées par des analyses physiques. La hauteur des rugosités dépend de l'état de l'eau en surface qui peut exister sous forme d'un film, de gouttes ou de ruisselets et elle est calculée à partir de l'équation d'équilibre entre les forces de tension de surface, aérodynamique et gravitationnelle. Les masses d'eau liquide résiduelle, de ruissellement et d'arrachement sont calculées à partir de modèles analytiques basés sur la hauteur des rugosités, tandis que la nouvelle position de la surface est calculée à l'aide d'une méthode géométrique basée sur les bissectrices entre les panneaux définissant la surface. Le modèle d'accrétion a été validé pour les régimes sec et humide avec des formes de glace obtenues expérimentalement en soufflerie par Shin et Bond. Les formes de glace prédites numériquement sont similaires à celles mesurées expérimentalement et le modèle a été en mesure de générer les formes complexes de glace observées comme les cornes et les cannelures. Les particularités du modèle développé font qu'il pourrait être appliqué aux cas où les vitesses sont faibles ou élevées, ou encore pour les objets tournants par rapport au sol comme pour les pales d'éoliennes ou d'hélicoptères.

**Mot Clefs :** Accrétion de glace, Simulation, Transfert de chaleur, Transfert de masse, Chaleur de convection, Rugosité de surface, Film d'eau, Avion, Éolienne

**Abstract :** AMIL (Anti-Icing Materials International Laboratory), in a joint project with CIRA (Italian Aerospace Research Center), developed software to simulate ice accretion in wet and dry regime on a fixed two-dimensional object. The ice accretion thermodynamic model is similar to existing models: LEWICE in the United States, TRAJICE in the United Kingdom, ONERA in France and CANICE in Canada, into which empirical correlations were replaced by physical analyses in the developed software. The roughness height depends on the surface water state, which can exist in the form of a film, bead or rivulet and is calculated from the equilibrium equation between the surface tension, aerodynamics and gravitational forces acting over the bead. Residual, runback and shedding water masses are calculated using analytical models based on the roughness height and the new surface position is calculated using a geometric method based on the bisection between the defining panel's surfaces. The accretion model was validated for dry and wet regimes with ice profiles obtained by Shin and Bond in wind tunnel experiments. The ice profiles numerically predicted are similar to those measured in wind tunnel and the model is able to generate the complex ice profiles observed in experiments, such as horns and grooves. The characteristics of the developed model are such that it can be applied to cases where speeds are slow or fast, or those involving object rotating with regard to the ground as blades of wind turbines or helicopters

**Key words:** Ice accretion, Simulation, Heat transfer, Mass transfer, Convective heat, Surface Roughness, Water film, Aircraft, Wind turbine

---

## Introduction

L'exploitation d'éoliennes dans les climats nordiques comme le Canada engendre une problématique particulière, soit le givrage des pales en conditions de pluie verglaçante et de brouillard givrant. Cette problématique est très importante, car les dépôts de givre qui s'y forment altèrent leurs caractéristiques

aérodynamiques, réduisant considérablement la performance de l'éolienne. Comme exemple, Yukon Energy possède deux éoliennes situées à une altitude de 1430 mètres qui sont soumises à des nuages givrants, ce qui occasionne une perte de production de l'ordre de 20% (Massan, 2001). Dans les cas de givrage sévère et en l'absence de systèmes de dégivrage, un dépôt important de givre peut entraîner la destruction de l'éolienne en

raison des fortes vibrations engendrées. Présentement, le givrage est contrôlé par l'utilisation de dispositifs chauffants qui sont activés durant les périodes critiques. Comme le chauffage s'effectue en aveugle, il est peu efficace énergiquement ce qui le rend très onéreux. Si ces systèmes sont essentiels pour assurer que l'éolienne ou ses pales ne soient pas endommagées, il est possible d'optimiser leur opération. Une technique consiste à calculer les pertes aérodynamiques et d'estimer la puissance perdue par l'éolienne, ainsi que le niveau de vibration induit par la glace à partir de simulations numériques de l'accrétion de glace sur les pales. En effet, ces simulations permettent d'identifier les conditions particulières du givrage qui réduisent les performances de l'éolienne et qui peuvent l'endommager. En intégrant aux simulations numériques les données météorologiques prises en temps réel sur les sites éoliens, il est possible d'utiliser les systèmes de dégivrage de façon optimale en les faisant fonctionner seulement lorsque la performance des éoliennes est en deçà d'un seuil critique, où les accumulations de givre ne peuvent pas endommager l'éolienne.

Il y a environ 50 ans, l'étude du givrage et de ses effets débutait. L'efficacité de la collection des gouttelettes d'eau sur un objet a été initialement étudiée par Langmuir et Blodgett, 1945 qui ont caractérisé l'efficacité de la captation d'un profil géométrique donné à l'aide d'un coefficient de collection. L'évidence d'un régime sec et d'un régime humide d'accrétion a été démontrée par Ludlam, 1951. Ce dernier a différencié les deux régimes de l'accrétion en étudiant la formation de la glace sur un cylindre tournant. Il a démontré que le taux d'accrétion de glace à une température donnée est déterminé par la teneur en eau liquide et la vitesse de l'écoulement. La teneur en eau liquide critique, séparant le régime sec (sans eau liquide sur la surface d'accrétion) et le régime humide, est appelée limite de Ludlam. L'accrétion de glace s'effectue en régime sec lorsque la teneur en eau liquide est inférieure à la limite de Ludlam, la température de surface étant inférieure à la température de solidification de l'eau. L'accrétion s'effectue en régime humide lorsque la teneur en eau liquide est supérieure à la limite de Ludlam. La température de la surface est alors égale à la température de solidification de l'eau et le surplus d'eau est évacué par arrachement. Fraser, Rush et Baxter, 1952, ont montré que dans certaines conditions, l'eau n'est pas totalement évacuée, mais qu'une certaine quantité ou la totalité de l'eau reste emprisonnée dans des poches de la matrice de glace où elle forme une glace spongieuse. Messinger, 1953, applique l'équation de la conservation de l'énergie à l'état quasi stationnaire d'un cylindre tournant, celle-ci devenant l'approche thermodynamique traditionnelle pour la modélisation du givrage. Cette équation traduit le fait que l'accrétion doit être en équilibre thermique impliquant, que la somme de tous les termes de chaleur est nulle. Lozowski *et al.*, 1979, ont développé un modèle thermodynamique du processus de croissance de la glace sur un cylindre fixe frappé par des gouttelettes d'eau surfondues. Ils ont utilisé une équation basée sur l'approche énergétique de Messinger, 1953, et ils ont simulé numériquement l'accrétion de glace afin de prédire les pertes aérodynamiques. De plus, le modèle de Lozowski *et al.*, 1979, prend en considération

l'accrétion mixte, le ruissellement, les termes de transfert de chaleur par conduction et convection à l'intérieur de la couche limite, le transfert de chaleur par diffusion induit par la masse évaporée et sublimée, la chaleur de l'eau captée à la température d'équilibre de la surface, le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur de la glace et du cylindre, la chaleur latente de solidification, le réchauffement aérodynamique créé par le travail de compression adiabatique de l'air dans la couche limite et l'énergie cinétique des gouttelettes d'eau surfondues qui heurtent le cylindre. Les résultats du modèle numérique ont été comparés aux données expérimentales mesurées par Stallabrass, 1957, et par Macklin, 1961.

Depuis 1980, plusieurs modèles numériques ont été développés dans le domaine de l'aéronautique. Plusieurs logiciels ont été conçus par différents groupes de chercheur à travers le monde pour simuler l'accrétion locale en régime sec et humide sur une aile en 2 dimensions. Mentionnons le LEWICE 2D (États Unis) décrit par Wright, 1995, celui de l'ONERA (France) décrit par Gent, 1990, le TRAJICE2D (Royaume Uni) décrit par Guffond, 1992, le CANICE (Canada) décrit par Paraschivoiu *et al.*, 1994, celui du CIRA (Italie) décrit par Mingione et Brandi, 1996 et le 2DFOIL-ICE (Université de Twente) décrit par Dillingh, 2003. La majorité des modèles précédemment cités ont été améliorés ou sont en cours d'amélioration pour prédire la formation de glace sur un objet tridimensionnel tel qu'une aile ou une nacelle. Mentionnons que le logiciel FENSAP-ICE 3D récemment développé à l'université McGill (Canada) et décrit par Habashi *et al.*, 2002, est le seul logiciel capable simuler le profil du dépôt de glace en 3D qui se forme sur un avion. Les récents perfectionnements des logiciels de simulation numérique incluent :

- le calcul de l'écoulement aérodynamique qui se base sur la méthode des panneaux pour les écoulements bidimensionnels (Wright, 1995, Gent, 1990, Paraschivoiu *et al.*, 1994, Mingione et Brandi, 1996 et Dillingh, 2003) ou les équations de Navier-Stokes pour les écoulements bi et tridimensionnels (Guffond, 1992 et Habashi *et al.*, 2002),
- les analyses des trajectoires des gouttelettes d'eau surfondues captées sur des formes géométriques complexes qui se basent généralement sur une méthode Lagrangienne (Wright, 1995, Gent, 1990, Guffond, 1992, Paraschivoiu *et al.*, 1994, Mingione et Brandi, 1996 et Dillingh, 2003) ou sur une méthode Eulerienne (Habashi *et al.*, 2002),
- le calcul de la couche limite, qui prend en considération la rugosité de la paroi due à la présence de glace pour calculer les coefficients d'échange thermique. Le calcul de la rugosité de surface est basé sur la corrélation empirique développée par Ruff et présentée dans l'article de Shin *et al.*, 1991, tandis que celui des échanges thermiques se base sur les travaux de Cebeci et Bradshaw, 1984,
- la thermodynamique de solidification, qui permet de déterminer localement le taux de croissance de glace et

qui se base sur l'équation développée par Messinger, 1953 et sur les travaux de Lozowski *et al.*, 1979,

- un module géométrique, qui additionne la surface de glace à la surface existante selon la direction des gouttelettes d'eau en régime sec (Wright, 1995, Gent, 1990, Guffond, 1992), ou selon le vecteur normal à la surface en régimes sec et humide (Wright, 1995, Gent, 1990, Guffond, 1992 et Langmuir et Blodgett, 1945)
- et une discrétisation du temps se basant sur les travaux de Lozowski *et al.*, 1979, pour une amélioration de la représentation géométrique et de la précision du calcul des coefficients locaux d'échange thermique et de masse.

Cependant, dans tous ces modèles, le comportement de l'eau liquide à la surface est simulé sans tenir compte de son état, ce qui oblige à utiliser des hypothèses simplificatrices. C'est pourquoi, la majorité des modèles simulent seulement le ruissellement de l'eau sous forme de film en se basant sur le modèle développé par Al-Khalil *et al.*, 1989 et 1991. Cette représentation ne tient pas compte qu'une certaine quantité d'eau peut demeurer sur la surface en raison des forces aérodynamique, gravitationnelle et de tension de surface.

Même si la rugosité de surface est reconnue comme étant l'un des facteurs les plus importants dans l'accrétion de la glace, elle n'a pas été étudiée de façon approfondie, tout comme la densité de la glace, l'eau liquide résiduelle, l'arrachement et l'éclaboussure des gouttelettes d'eau surfondues. Généralement, ces facteurs sont estimés en utilisant des corrélations empiriques. Parmi les corrélations les plus courantes, mentionnons celle développée par Ruff en 1990 qui a été utilisée par Shin et Bond, 1992 pour estimer la hauteur des rugosités de surface, celle développée par Olsen et Walker, 1986, pour représenter l'arrachement, l'éclaboussure, et l'eau liquide résiduelle, ainsi que celle développée par Jones, 1988, pour estimer la densité de la glace. Comme elles ont été développées dans le domaine de l'aéronautique, ces corrélations empiriques sont difficilement applicables aux pales d'éoliennes, en raison de conditions d'utilisation (vitesse, altitude, angle d'attaque et position du profil par rapport au sol) et météorologiques (teneur en eau liquide et diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau) qui sont très différentes.

Les recherches effectuées au cours des dix dernières années ont permis de mieux comprendre la rugosité et la physique de la phase liquide. Citons comme exemple :

- les travaux de Shin, 1994, sur la mesure et la distribution des rugosités à la surface de la glace qui ont démontré que la corrélation empirique développée par Ruff (Shin et Bond, 1992), où la rugosité de surface est exprimée en valeur équivalente de papier émeri, n'est pas une représentation réaliste de la distribution et de la dimension des hauteurs de rugosité locale, surtout lorsque la surface est recouverte par un film d'eau,
- les études de Al-Khalil *et al.*, 1989 et 1991, qui permettent de décrire analytiquement la formation et le

mouvement du film et des ruisselets de surface comme étant le résultat de l'équilibre entre les forces de cisaillement induites par les effets aérodynamiques,

- les travaux de Hansman *et al.*, 1992, qui ont démontré que la tension de surface est probablement le principal facteur responsable de la formation des gouttes à la surface de l'aile et finalement,
- les travaux de Fortin *et al.*, 2003, qui ont permis de mieux comprendre le comportement de la phase liquide sur la surface de l'aile et conduit au développement d'un modèle de ruissellement et de rugosité de surface basé sur les forces gravitationnelle, aérodynamique et de tension de surface permettant de remplacer les corrélations empiriques couramment utilisées dans les modèles numériques simulant la formation du givre.

Ces développements permettent maintenant d'adapter le modèle thermodynamique couramment utilisé pour prédire le givrage des avions en vol au problème de givrage des éoliennes car la phase liquide et la rugosité ne dépendent plus de corrélation empirique, mais de paramètres physiques.

### Objectifs

L'objectif de cet article est de présenter le modèle numérique simulant l'accrétion de la glace sur un objet bidimensionnel soumis à une précipitation givrante (Figure 1) qui a été développé par Fortin *et al.*, 2003 au LIMA (Laboratoire International des Matériaux Antigivre) en collaboration avec le CIRA (Italian Aerospace Research Centre, Mingione et Brandi, 1996).

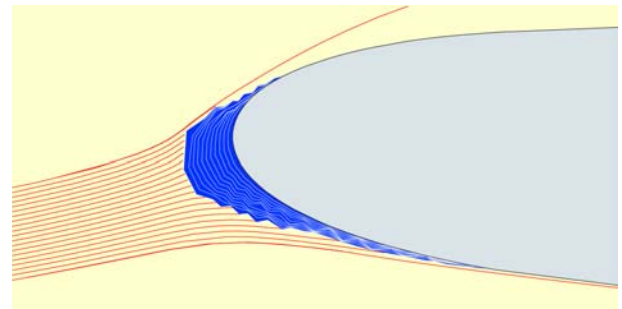


Figure 1 : Aile d'avion soumise à une précipitation givrante.

### Description du modèle

Pour arriver à prédire les profils de glace, le logiciel d'accrétion simule le processus de refroidissement thermodynamique des gouttelettes d'eau surfondues qui heurtent l'aile d'avion. La durée du givrage appelée temps d'accrétion est divisée en incréments comme dans le modèle de Lozowski *et al.*, 1979. La méthode de calcul utilisée permet de résoudre, pour chaque incrément de temps et pour chaque élément de surface, les équations différentielles de premier ordre de la conservation de la masse et du transfert de chaleur qui ont été développés

initialement par Messinger, 1953. Les caractéristiques de la surface qui tiennent compte des régimes d'accrétion sont obtenues en appliquant un modèle microscopique qui simule la croissance des gouttes d'eau à la surface de l'objet.

Le module aérodynamique calcule l'écoulement d'air autour de l'objet (Figure 2). La méthode des panneaux est utilisée pour le calcul de l'écoulement potentiel selon le profil de l'objet. Par la suite, la vitesse au voisinage de la surface est calculée, ainsi que la hauteur de la couche limite, l'épaisseur de la quantité de mouvement en utilisant la formulation de Thwaites (Kays and Crawford, 1993) et le coefficient local de frottement (Cebeci et Bradshaw, 1984).

Le module des trajectoires établit le parcours des gouttelettes d'eau surfondues (Figure 2) dans un écoulement potentiel en deux dimensions selon une méthode Lagrangienne. Les trajectoires que suivent les gouttelettes surfondues, ainsi que leurs points d'impact sur l'objet, sont calculés à partir du champ de vitesses et des conditions météorologiques, permettant de déduire les coefficients locaux d'efficacité de collection. Les gouttelettes sont considérées comme étant des particules ce qui implique que leur déformation et leur évaporation ne sont pas prises en considération.

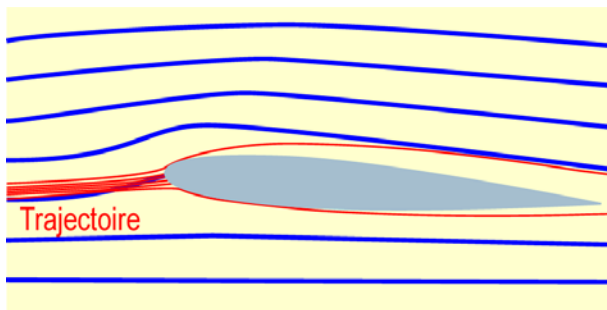


Figure 2 : Écoulement équipotentiel et trajectoires de gouttelettes d'eau.

Le coefficient de collection  $\beta$  est déterminé en effectuant le ratio de la surface transversale du tube d'eau située en amont dans l'écoulement,  $\Delta y$  et de l'étendue de la surface où les gouttelettes impact sur l'objet,  $\Delta s$  (Figure 3).

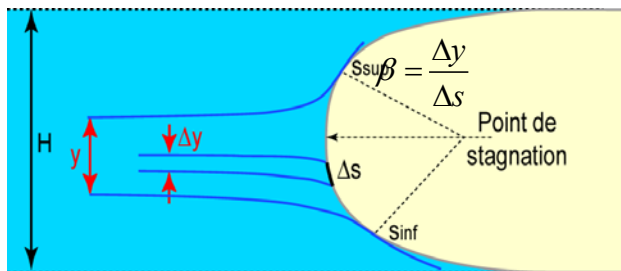


Figure 3 : Trajectoires de gouttelettes d'eau surfondues.

L'efficacité de la collection qui est un paramètre essentiel pour calculer la quantité d'eau captée par l'objet est obtenue par un lissage des coefficients de collection (Figure 4).

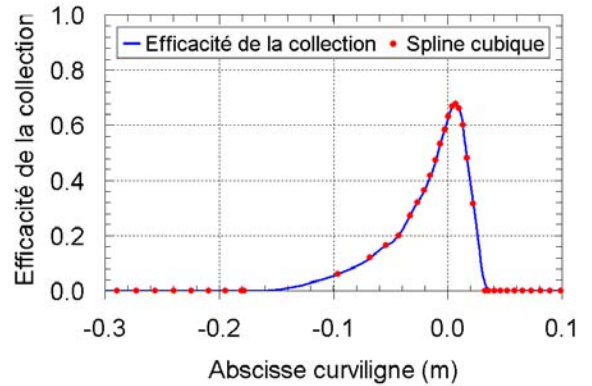


Figure 4 : Efficacité de la collection.

Les coefficients locaux de diffusion de masse et de transfert de chaleur par convection sont estimés à partir du champ de vitesse, de la couche limite et du type d'écoulement en considérant que la surface est une plaque plane rugueuse (Figure 5). Par la suite, pour chaque incrément de temps, le modèle thermodynamique de l'accrétion de glace est appliqué sur chaque panneau, permettant ainsi de calculer la masse de glace accumulée. Le modèle thermodynamique permet aussi de déterminer le régime d'accrétion, la fraction solide, ainsi que la température à laquelle la glace se forme.

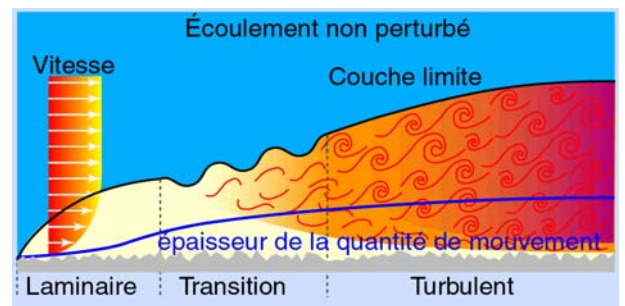


Figure 5 : Écoulement sur une plaque plane rugueuse.

Dépendamment de la température et de la vitesse, différents régimes d'accrétion peuvent être rencontrés. Le régime d'accrétion peut être sec ou humide, et les deux régimes peuvent coexister sur la surface de l'aile. Généralement, lorsque les régimes coexistent, les zones près du point de stagnation sont en régime humide, tandis que celles plus éloignées sont en régime sec (Figure 6). En régime sec, toute l'eau captée se transforme en glace. La fraction solide est égale à 1 et la température de surface

est inférieure à 0°C. En régime humide, une fraction de l'eau captée se transforme en glace. La température de surface est égale à 0°C et la fraction solide est comprise entre 0 et 1. En régime liquide, toute l'eau captée demeure liquide. Si la fonte de la glace n'est pas considérée, la fraction solide est égale à 0 et la température de surface est supérieure à 0°C.

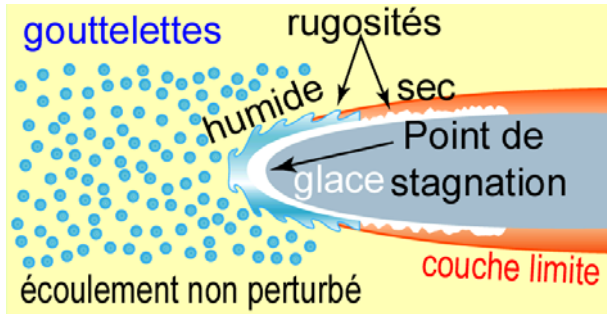


Figure 6 : Régime d'accrétion.

Un bilan thermique à la surface de l'objet est utilisé pour déterminer la température de surface et la fraction solide (Figure 7). Il prend en considération le gain de chaleur produit par la solidification (latente et sensible), la perte de chaleur par convection, ainsi que par évaporation si le régime d'accrétion est humide ou par sublimation si le régime d'accrétion est sec. Ces termes correspondent aux pertes de chaleur. D'autres termes, de moindre impact, mais dont l'importance ne peut être omise, comme ceux des pertes de chaleur par conduction et par radiation, ainsi que ceux des échauffements adiabatique et cinétique, sont inclus dans le bilan thermique. Même si la radiation atmosphérique est incluse, elle n'a pas été considérée pour la validation car celle-ci a été effectuée en laboratoire.

Les bilans des masses entrante et sortante viennent compléter le modèle thermique. La masse d'eau entrante est composée de la masse d'eau captée par la surface, de l'eau demeurée liquide au temps précédent appelée eau restante et de l'eau demeurée liquide sur le panneau en amont et qui s'écoule en aval en raison des forces aérodynamique et gravitationnelle appelée eau d'écoulement. La masse d'eau sortante est composée de la masse d'eau gelée, des masses d'eau évaporée et de glace sublimée, de l'eau restante au temps présent appelée eau résiduelle, et de l'eau s'écoulant vers le panneau en aval.

Un facteur important qui affecte considérablement la bilan thermique et indirectement le bilan de masse est la rugosité de surface utilisée dans le calcul du coefficient de transfert de masse et de chaleur par convection. Des modèles analytiques ont été développés par Fortin *et al.*, 2003, afin de prédire la hauteur des rugosités et la masse d'eau emprisonnée sur la surface.

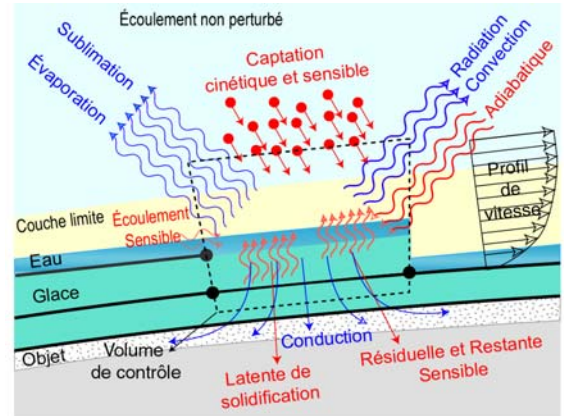


Figure 7 : Bilan thermique sur un volume de contrôle.

Dans la zone de captation, l'eau peut se retrouver à l'état de film ou de gouttes hémisphériques (Figure 8), dépendamment de la quantité d'eau captée et de la vitesse en surface. L'eau est sous forme de film lorsque la hauteur du film est supérieure à la hauteur que les gouttes peuvent atteindre avant de se mettre en mouvement. Dans la zone de ruissellement, l'eau peut se retrouver sous la forme de film ou de ruisselets (Figure 8), dépendamment de la quantité d'eau qui s'écoule et de la vitesse au niveau de la surface. Comme pour la zone de captation, l'eau est sous forme de film lorsque la hauteur du film est supérieure à la hauteur que les gouttes peuvent atteindre avant de se mettre en mouvement.

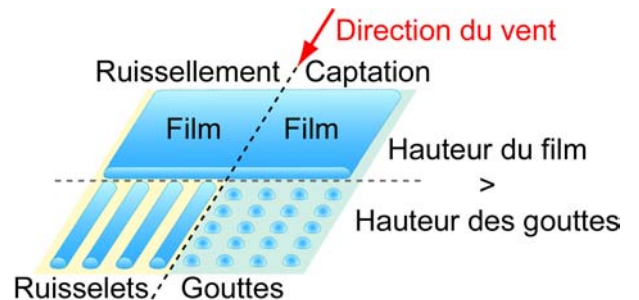


Figure 8 : État de l'eau à la surface.

Lorsque l'état de l'eau à la surface est connu, la hauteur des rugosités est égale à la hauteur de la vague dans le cas du film (Figure 9 a), à la hauteur des gouttes (Figure 9 b) ou à la hauteur des ruisselets (Figure 9 c). L'état de l'eau à la surface est déterminé en comparant la hauteur du film d'eau et la hauteur maximale que les gouttes peuvent atteindre avant de se mettre en mouvement. La hauteur du film est calculée en considérant que toute la masse d'eau entrante se transforme en un film continu, en assumant que l'écoulement du film est laminaire et que le cisaillement du film est égal à la contrainte de cisaillement sur la paroi.

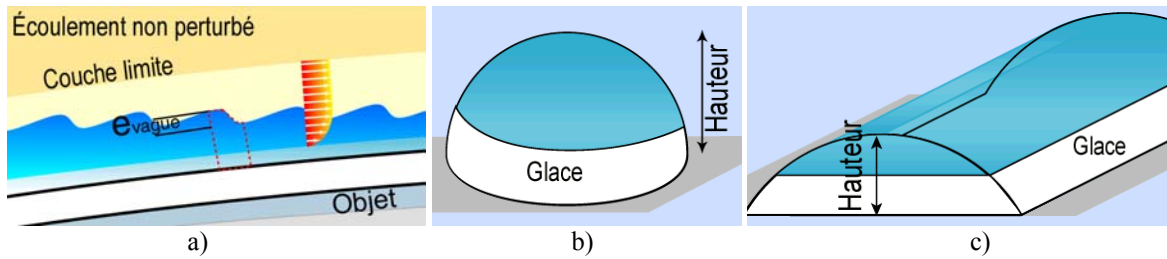


Figure 9 : Forme de l'eau à la surface : a) Vague, b) Goutte hémisphérique et c) ruisselet.

La hauteur des gouttes hémisphériques est obtenue à partir des forces s'exerçant sur la goutte selon l'axe de mouvement (Figure 10) et en négligeant la pression interne. Les forces en jeu sont la composante de la force gravitationnelle parallèle à l'axe de mouvement, la force de traînée produite par le vent et la force de tension de surface produite par l'hystérésis. L'hystérésis qui est la différence entre les angles de contact maximum et minimum est produit par la déformation de la goutte et représente l'équilibre entre les forces.

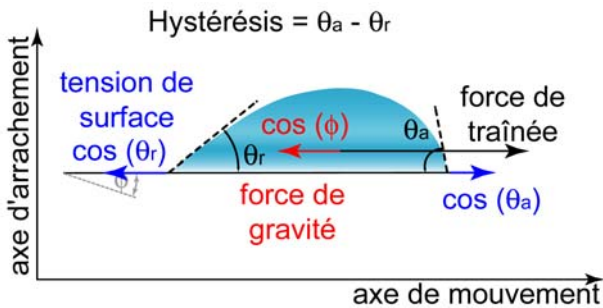


Figure 10 : Forces agissant selon l'axe de mouvement pour une goutte déformée.

La hauteur maximale que peuvent atteindre les gouttes avant de se mettre en mouvement et de se transformer en film est obtenue lorsque la sommation des forces selon l'axe de mouvement est égale à 0 et que l'hystérésis est maximum.

Les signes sont fonction de l'orientation de la surface et de l'intensité des forces de vent et de gravité.

L'eau résiduelle est calculée en effectuant un bilan massique basé sur l'état de l'eau (film, ruisselets ou gouttes) et sur la hauteur maximale que les gouttes peuvent atteindre avant de se mettre en mouvement. L'eau de ruissellement est la masse d'eau demeurée liquide diminuée des masses d'eau résiduelle et évaporée.

Finalement, la masse de glace accumulée durant l'incrément de temps est transformée en volume de glace compte tenue de sa

densité. Pour prédire le profil de glace qui se forme sur l'objet, le volume est additionné dans la direction normale à la surface en utilisant un modèle géométrique basé sur la croissance le long des bissectrices entre deux panneaux adjacents (Figure 11). La section de glace qui s'ajoute est définie par les surfaces triangulaires  $A_1$  et  $A_2$  et délimitée par les bissectrices passant par les nœuds 1 et 2. Comme le nœud n1 est connu, la construction d'un nouveau panneau s'effectue de façon continue et en une seule opération.

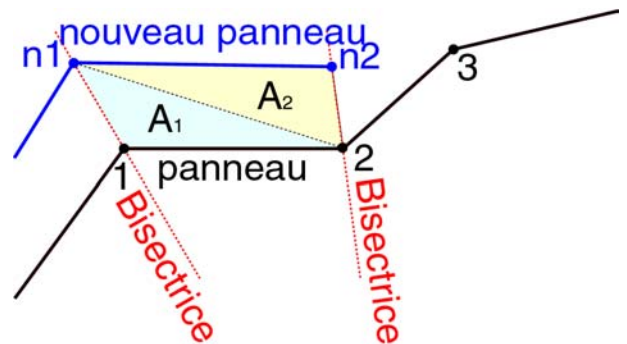


Figure 11 : Construction d'un nouveau panneau.

La croissance débute sur le panneau stationnaire qui est défini comme étant le panneau le plus près du point de stagnation. Mais pour débiter le processus de construction, une condition supplémentaire est nécessaire, deux nœuds devant être déterminés simultanément. Celle-ci est obtenue en supposant que le nouveau panneau croît parallèlement à l'ancien panneau (Figure 12).

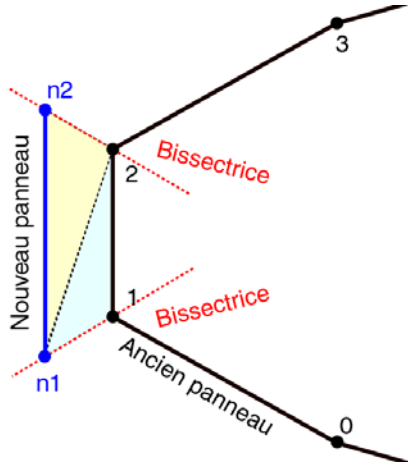


Figure 12 : Construction du premier panneau.

### Résultats

Le logiciel CIRALIMA-2D a été évalué dans sept cas avec le profil d'aile NACA 0012 montré à la Figure 13. Ce logiciel est la combinaison de l'algorithme CIRA-2D qui calcule les écoulements équipotentiels, les trajectoires et le coefficient de collection, et de celui LIMA 2D qui calcule le coefficient de transfert de chaleur par convection, la hauteur des rugosités, la masse de glace accrétée, ainsi que la nouvelle géométrie.

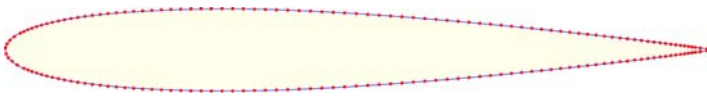


Figure 13 : Profil d'aile NACA 0012.

Le profil a été soumis aux conditions météorologiques et de vol qui sont donnés au Tableau 1. Les simulations ont été effectuées à sept températures (-28,3°C, -19,4°C, -13,3°C, -10,0°C, -7,8°C, -6,1°C et -4,4°C) couvrant les régimes sec et humide. Les conditions utilisées pour la validation du modèle qui ont été obtenues en laboratoire correspondent à un avion volant à une altitude de croisière de 10 kilomètres, traversant un nuage givrant le soumettant à des conditions de givrage sévère.

Tableau 1 : Conditions météorologiques et de vol

Temps d'accrétion	360 sec
Angle d'attaque	4 °
Corde	0,5334 m
Vitesse	67,05 m/sec
Pression atmosphérique	101 300 Pa
Humidité relative	100%
Teneur en eau liquide	1 g/m <sup>3</sup>
Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau	20 µm
Rugosité initiale	0,628 mm

Les profils de glace obtenus lors de la simulation sont comparés à ceux obtenus par Shin et Bond, 1992, dans les mêmes conditions et avec le même profil d'aile au laboratoire de la NASA Lewis Icing Research Tunnel (IRT), ainsi qu'à ceux calculés avec les programmes 2D LEWICE/IBL (Shin et Bond, 1992) et 2D CIRA (Mingione et Brandi, 1996). Les expériences de Shin et Bond, 1992, ont été répétées deux fois avec une reproductibilité acceptable pour les profils expérimentaux, même si aucune barre d'erreur n'est donnée. Dans la soufflerie réfrigérée du IRT, le profil d'aile est placé en position verticale, l'accélération gravitationnelle étant perpendiculaire au vent. Le modèle de rugosité a été développé pour des conditions de vol pour lesquels l'accélération gravitationnelle et le vent agissent dans la même direction. Cependant, l'équation d'hystérésis mixte peut être utilisée avec un faible pourcentage d'erreur (moins de 5%), lorsque l'accélération gravitationnelle est perpendiculaire au vent et si la force gravitationnelle est 10 fois moindre que celle du vent. Les rugosités de surface obtenues par la simulation numérique sont comparées à celles calculées avec la corrélation empirique de Shin et Bond, 1992, cette dernière étant utilisée dans la majorité des modèles numériques d'accrétion.

Pour la température statique de -26,1°C, le régime d'accrétion est sec. La forme prédite est similaire à celle mesurée (Figure 14), mais la quantité de glace accumulée est légèrement supérieure à celle mesurée. La forme prédite est identique à celles prédites avec les modèles du LEWICE (Shin et Bond, 1992) et du CIRA (Mingione et Brandi, 1996).



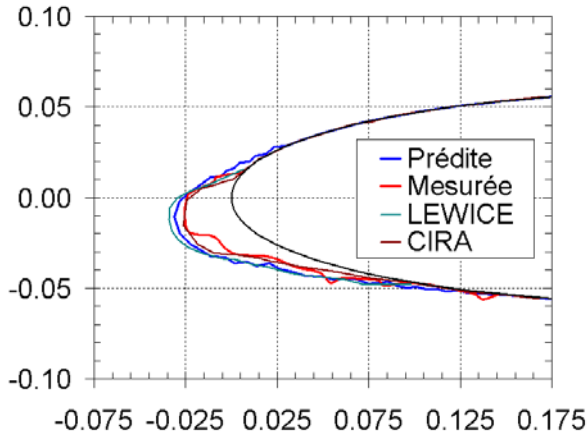


Figure 14 : Comparaison profil de glace -26,1 °C.

Pour la température statique de -11,1°C, le régime d'accrétion est mixte, c'est-à-dire que l'accrétion débute en régime sec et, en raison de la libération de la chaleur latente de fusion, se termine en régime humide. La forme prédite est très similaire à celle mesurée (Figure 15), mais la quantité de glace accumulée est légèrement supérieure à celle mesurée. La corne prédite qui est une caractéristique des régimes humide et mixte est située au même endroit que celle mesurée. La forme prédite par le modèle du LIMA est en meilleur accord avec celle mesurée que celles prédites avec les modèles du LEWICE (Shin et Bond, 1992) et du CIRA (Mingione et Brandi, 1996).

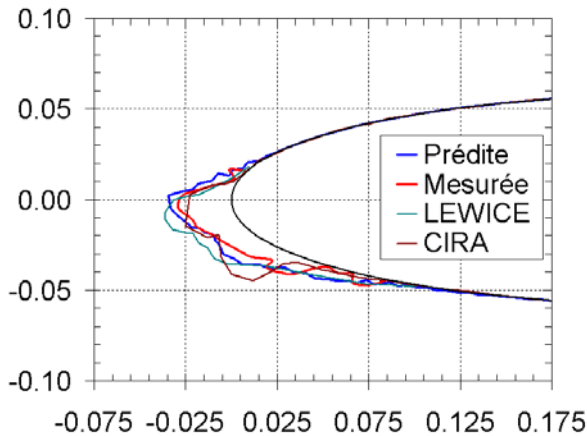


Figure 15 : Comparaison profil de glace -11,1 °C.

Pour la température statique de -5,6°C, le régime d'accrétion est humide. La forme prédite est très similaire à celle mesurée (Figure 16), mais la quantité de glace accumulée est légèrement supérieure à celle mesurée. La corne prédite est située au même endroit que celle mesurée.

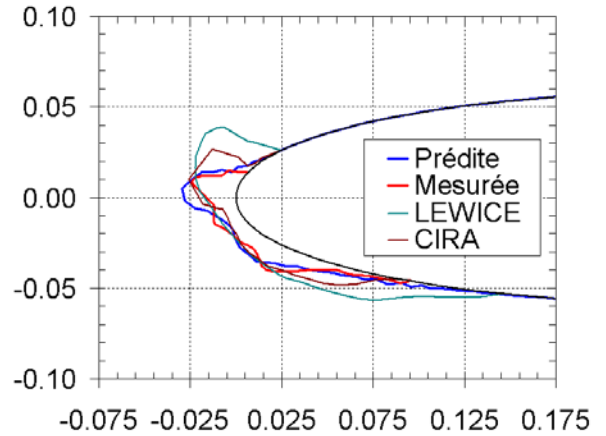


Figure 16 : Comparaison profil de glace -5,6 °C.

De façon générale, la forme prédite par le modèle du LIMA est en meilleur accord avec celle mesurée que celles prédites avec les modèles du LEWICE (Shin et Bond, 1992) et du CIRA (Mingione et Brandi, 1996).

### Conclusion

Les nouveaux modèles analytiques développés pour le calcul de la hauteur des rugosités locales, des masses d'eau résiduelle et ruisselante, de la position de la surface de glace combinés au modèle thermodynamique couramment utilisé pour l'accrétion de la glace sur les ailes d'avion ont pu prédire des formes de glace similaires à celles obtenues en laboratoire.

Dans la majorité des cas, le volume de glace prédit est légèrement supérieur à celui mesuré. Les raisons expliquant cette surévaluation ne sont pas connues, mais, comme elle est observée en régime sec, plusieurs groupes soupçonnent les modèles utilisés pour le calcul des trajectoires et du coefficient de captation. Présentement, le LEWICE travaille à mesurer avec précision le coefficient de captation sur un profil d'aile pour vérifier cette hypothèse. Quant à la surévaluation du volume de glace observée en régime humide, le coefficient de captation n'est pas le seul en cause. En effet, le calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection qui dépend de la rugosité de surface, de l'état et du comportement de l'eau en surface, ainsi que de l'arrachement de l'eau en surface sont aussi en cause. Plusieurs études devront être encore menées pour comprendre et expliquer ces mécanismes complexes de l'accrétion. En dépit de la légère surévaluation prédite, les résultats montrent la capacité du modèle numérique à reproduire les profils de glace observés durant les régimes sec et humide de croissance et spécialement, les protubérances observées en régime humide.

Le modèle d'accrétion développé peut être adapté au givrage des éoliennes et des hélicoptères en utilisant une vitesse et un angle d'attaque apparent de façon à prendre en considération la vitesse de rotation de l'éolienne, la vitesse du vent, l'angle d'attaque du profil de la pale ainsi que la position radiale. De plus, le modèle

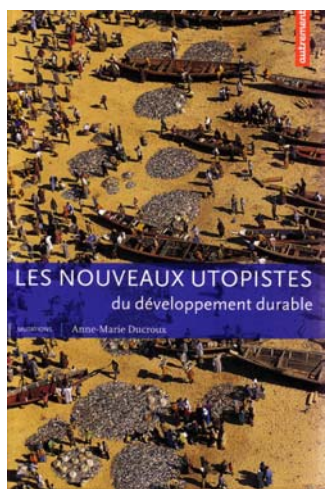
analytique développé pour le calcul de la hauteur des rugosités prend en considération la vitesse de l'air et son intensité à la surface de l'objet qui varient en fonction de la position radiale et de l'orientation par rapport au sol, le rendant applicable aux pales des éoliennes.

## Bibliographie

- Al-Khalil K.M., Keith T. G., De Witt Jr., K. J., Nathman J. K. and Dietrich D. A., 1989. *Thermal Analysis of Engine Inlet Anti-Icing Systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 27<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 89-0759, Reno, Nevada, pp. 9, January.
- Al-Khalil K. M., Keith T. G. Jr. and De Witt K. J., 1991. *Further Development of an Anti-Icing Runback Model*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 29<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-91-0266, Reno, Nevada, pp. 12, January.
- Cebeci T. and Bradshaw P., 1984. *Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer*, New York, pp. 165-201.
- Beaugendre H., Morency F. and Habashi W. G., 2002. *ICE3D, FENSAP-ICE'S 3D In-Flight Ice Accretion Module*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 40<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, AIAA 2002-0385, January.
- Dillingh J. E. and Hoeijmakers H. W. M., 2003. *Accumulation of Ice Accretion on Airfoils during Flight*, Presented at Federal Aviation Administration In-flight Icing and Aircraft Ground De-icing, Conference, Chicago, Illinois, pp.13, June 16-20.
- Fortin G., Ilinca A., Laforte J.-L. and Brandi V., 2003. [A New Roughness Computation Method and Geometric Accretion Model for Airfoil Icing](#), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Journal of Aircraft, Volume 40, No. 5, September-October.
- Fraser D., Rush C. K. and Baxter D., 1952. *Thermodynamic Limitations of Ice Accretion Instruments*, National Aeronautical Establishment (NAE), Laboratory Report LR-32, National Research Council (NRC), Ottawa, Canada, pp. 12.
- Gent R. W., 1990. *TRAJICE2, A Combined Water Droplet and Ice Accretion Prediction Program for Aerofoil*, Royal Aerospace Establishment (RAE), Farnborough, Hampshire, Technical Report Number TR90054, pp. 83, November.
- Guffond D., Hedde T. and Henry R., 1993. *Overview of Icing Research at ONERA*, Advisory Group for Aerospace Research and Development / Fluid Dynamics Panel (AGARD/FDP) Joint International Conference on Aircraft Flight Safety - Actual Problems of Aircraft Development, Zhukovsky, Russia, pp. 7, August 31 - September 5.
- Hansman Jr. R.J. and Turnock S. R., 1988. *Investigation of Surface Water Behavior During Glace Ice Accretion*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 26<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, AIAA 88-0015, pp. 10, January.
- Jones K.F., 1988. *The Density of Natural Ice Accretions, Fourth International Conference on Atmospheric Icing of Structure*, E. D. F., volume 77, #1, pp. 114-118, Paris, September.
- Kays W.M. and Crawford M.E., 1993. *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill Book Company, 3<sup>th</sup> edition, pp. 206-301.
- Langmuir I. and Blodgett K.B., 1945. *A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories*, Vol. 10, Program Press 196, Report No. RL-224, pp. 348-355, July.
- Lozowski E.P., Stallabras J.R. and Hearty P.F., 1979. *The Icing of an Unheated Non-Rotating Cylinder in Liquid Water Droplet-Ice Crystal Clouds*, National Research Council (NRC) Laboratory report #LTR-LT-96, pp. 66.
- Ludlam F.H., 1951. *The Heat Economy of a Rimed Cylinder*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 77, #1, pp. 663-666.
- Macklin W.C., 1961. *Accretion in Mixed Clouds*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 87, #1, pp. 413-424.
- Maissou J. F., 2001. *Wind Power Development in Sub-Arctic Conditions with Severe Rime Icing*, Presented at the Circumpolar Climate Change Summit and Exposition Whitehorse, Yukon, Canada, March 19-21.
- Messinger B.L., 1953. *Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as a Function of Airspeed*, Journal of the Aeronautical Sciences, vol. 20, #1, pp. 29-42.
- Mingione G. and Brandi V., 1998. *Ice Accretion Prediction on Multielements Airfoils*, Journal of Aircraft, Vol.35, No. 2, March-April.
- Olsen W. and Walker E., 1986. *Experimental Evidence for Modifying the Current Physical Model for Ice Accretion on Aircraft Surfaces*, NASA Technical Memorandum #87184, pp. 47.
- Pueyo A., Chocron D. and Kafyeke F., 2001. *Improvements to the Ice Accretion Code CANICE*, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI), Aerodynamic Symposium, Toronto, Canada, pp. 9, April.
- Shin J., 1994. *Characteristics of Surface Roughness Associated With Leading Edge Ice Accretion*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 32<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, AIAA-94-0799, pp. 16, January.
- Shin J., Berkowitz B., Chen H. and Cebeci T., 1991. *Prediction of Ice Shapes and their Effect on Airfoil Performance*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 29<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-91-0264, Reno, Nevada, January.
- Shin J. and Bond T., 1992. *Experimental and Computational Ice Shapes and Resulting Drag Increase for a NACA 0012 Airfoil*, National Aeronautical and Space Administration (NASA), Technical Memorandum 105743, pp. 10, January.
- Shin J. and Bond T., 1992. *Results of an Icing Test on a NACA 0012 Airfoil in the NASA Lewis Icing Research Tunnel*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 30<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, AIAA-92-0647, pp. 19.
- Stallabras J.R., 1957. *Icing Flight of a Bell HTL-4 Helicopter*, National Aeronautical Establishment, Laboratory Report #LR-197, National Research Council (NRC), Ottawa, Canada, pp. 14.
- Tran P., Brahimi M.T., Paraschivou I. Pueyo A., Tezok F., 1994. *Ice accretion on Aircraft Wings with Thermodynamic Effects*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Presented at 32<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, AIAA-1994-0605, pp. 9, January.
- Wright W.B., 1995. *Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6*, National Aeronautical and Space Administration (NASA), Contractor Report, pp. 95, May

## J'ai lu

**Les nouveaux utopistes du développement durable**  
Collectif sous la direction de **Anne-Marie Ducroux**,  
Les Éditions Autrement, Paris, 2002



Le livre *Les nouveaux utopistes du développement durable* présente une collection de textes écrits par des personnes clés, ou dont on relate les propos, oeuvrant dans les différentes sphères sociales. Ces personnes proviennent d'horizons diversifiés : industriels, assureurs, grandes ONG internationales préoccupées par des questions de justice et d'environnement, milieu universitaire, arts. En tout, plus d'une trentaine de points de vue ont été

rassemblés pour former un portrait qui décline l'éventail des nuances du développement durable. Si le lecteur peut parfois avoir une impression de redite, chaque texte comporte néanmoins un élément nouveau. Les thèmes abordés sont très variés, passant de la science au risque, à l'éthique, à la corruption, aux médias, à la politique, à l'économie sans oublier la solidarité.

Le lecteur ne trouvera pas dans ces courts textes d'analyse scientifique; il s'agit plutôt de réflexions d'ordre éthique, philosophique, voire stratégique. Le lecteur informé des questions d'environnement et de développement durable n'y trouvera pas non plus une foule d'informations nouvelles, mais pourra y puiser des pistes de réflexion notamment sur le monde industriel et la politique. Le propos est fortement orienté vers la réalité française, avec quelques ouvertures sur la Communauté européenne, en plus de comporter une utilisation parfois excessive, et non nécessaire, des termes anglais.

Ce portrait très riche du paysage du développement durable propose une section nommée Complément qui recèle des informations riches et précieuses, tels que des extraits des textes fondateurs du concept de développement durable et autres textes de références sur les droits humains et la conférence de Rio, une chronologie des dates importantes, des textes de lois, françaises, un glossaire ainsi que des bibliographies pour chacun des chapitres, en plus d'une biographie des différents auteurs. De plus, vous y découvrirez entre autres un tableau sur les indices, à la Bourse, éthiques par pays, ainsi que le concept d'écophagie, soit l'invasion éventuelle de tous les écosystèmes par des êtres artificiels auto-reproducteurs, devenus aussi destructeurs

qu'incontournables (voir p.246). Un concept qui porte à réflexion avec la levée du moratoire sur la commercialisation des produits OGM en Europe. Une bonne lecture, pour plonger dans l'univers d'utopistes réalistes.

S. Hamel-Dufour

**Amphibiens et reptiles du Québec et des maritimes**  
**Jean-françois Desroches et David Rodrigue**  
Éditions Michel Quitin  
2004, 288p.

Pour plusieurs d'entre nous, l'enfance a été marquée par la recherche dans les sous-bois ou dans les marais de grenouilles, de salamandres, de tortues ou encore de couleuvres. Je me rappelle encore mes expéditions dans un boisé du pourtour du lac Champlain à la recherche de Salamandres. Recherche de patience à retourner les roches et les feuilles pour finalement voir filer devant nous le but de notre recherche. Qu'importe nous étions récompensés par cette apparition fugitive. Nous avions l'impression de retourner à l'époque des chasses aux sorcières de Salem car les salamandres sont associées à celles-ci.

En quittant ce boisé, j'ai aussi laissé cette passion. Ce n'est pas le cas de Jean-François Desroches et David Rodrigue, deux herpétologistes, qui nous livrent cet excellent guide d'éveil à ce monde mal aimé. Pourtant, les amphibiens et les reptiles durement touchés par la fragmentation des habitats et la détérioration de l'environnement, sont les canaris des mines de charbons. Nous gagnerions à mieux les connaître. Une guide pour les identifier et les reconnaître tombe à point pour sensibiliser les jeunes et moins jeunes.

Le guide amphibien et reptiles du Québec et des maritimes regroupe de nombreuses informations sous forme de fiches signalétiques donnant la description, le mode de reproduction, l'habitat, le domaine vital, l'alimentation, les prédateurs et la situation de l'espèce. Il fournit aussi des informations sur le code éthique de l'herpétologiste, sur l'observation et la récolte de spécimens, sur la conservation et l'anatomie de ces animaux.

Plusieurs espèces d'amphibiens sont menacées de disparition au Québec. Prenons notre guide, et commençons à reconnaître-identifier ces vertébrés, indicateurs essentiels de l'état de notre environnement.

É.Duchemin

**Les batailles de l'eau : pour un bien commun de l'humanité**

**Mohamed Larbi Bouguerra**

**Éditions Écosociété, 2003, 239p.**

**Collection Enjeux planète**

L'année internationale de l'eau de l'ONU a donné lieu à de nombreux ouvrages ou essais sur cette ressource vitale pour la survie des individus, mais aussi pour celle des civilisations et des nations. Bien que nous ne guerroyions pas encore pour l'eau, tel que le prophétise certains spécialistes depuis une décennie, la gestion de l'eau exacerbe des tensions existantes. Nous pouvons penser à l'Égypte et ses voisins sur le Nil, aux partages des eaux sur les grands fleuves de l'Afrique de l'Ouest, ou encore à la gestion du Mekong. Pour ne nommer que ces trois exemples.

La qualité des ouvrages a été très variable selon l'angle choisi pour aborder la problématique. Mohamed Larbi Bouguerra dans son essai *Les batailles de l'eau : pour un bien commun de l'humanité* a décidé d'aborder la problématique tant au plan politique, de la santé, de l'éthique, du symbolique, de la gestion, de la pollution que de la répartition des ressources. En fait, il tente de survoler l'ensemble de la problématique. Le risque d'une telle approche est de diluer l'analyse et l'intérêt du livre. Risque qu'il ne réussit pas à contourner. Tel que le dit le proverbe qui embrasse trop mal étreint. Surtout que l'ouvrage n'utilise aucun tableau ou figure de synthèse. Ceci rend la lecture ardue, l'auteur passant d'un exemple à l'autre, d'un continent à l'autre sans que nous ayons de repères comparatifs.

**Découverte:** GreenFacts Foundation (<http://www.greenfacts.org>), une nouvelle association, basée à Bruxelles, qui produit des résumés des documents scientifiques sur les questions d'environnement et de santé. Les résumés sont publiés en 4 langues (dont le Français) dans une structure conviviale de questions-réponses à 3 niveaux de détails. Toutes les publications sont revues et approuvées par un comité scientifique indépendant. Sur ma table de chevet: *Aménagement paysager adapté à la sécheresse* de Jacques Bougie et Édith Smeesters (Éditions Broquet, 2004, 183 p.) un livre pour un aménagement écologique de nos jardins et cours arrière. Sur mon bureau: Numéro spécial sur le sommet de Johannesburg avec un CD-ROM sur des informations, références et textes choisis sur le développement durable. Ouvrage publié par l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie (<http://www.iepf.org>). Bien qu'incomplet le CD-ROM donne une base historique sur de nombreuses problématiques et protocoles environnementaux. La section liens est très pauvre. Dommage car l'idée de départ est bonne, toutefois dans un tel projet il faudrait prévoir des mises à jour.

On finit par être étourdi de voyager ainsi du Canada, à l'Europe, de l'Afrique au États-Unis, de la Chine au Maghreb.

Toutefois ce livre, reflète une vision particulière de la problématique. Plusieurs exemples proviennent d'Afrique. L'auteur aurait eu intérêt à rester dans cette optique et de développer son essai sur les exemples de cette région du monde, dont peu de choses sont divulgués.

L'essai donne l'impression d'avoir été écrit rapidement, sur commande et sans relecture. Ainsi dès l'amorce du livre, l'auteur nous sort des : comme le disent les Peaux-Rouges. Enfin, les références sont en grande majorité des articles de journaux. Sans être complètement contre une telle pratique, je trouve que cela laisse place à des interprétations dans les conclusions. Les contraintes journalistiques, trop souvent, permettent de divulguer qu'une partie du problème.

Une histoire à suivre pour cette collection, dont nous avons aimé les deux premiers essais (VertigO, Vol3 No3, 2002). Prenez note que seront publiées dans les prochains numéros de la revue, des recensions sur d'autres livres illustrant les différentes facettes de la gestion de l'eau.

É. Duchemin

## Les Éditions en Environnement VertigO

### La revue électronique en sciences de l'environnement VertigO

La revue électronique **VertigO**, fondé en avril 2000, s'est donnée pour mandat la promotion et la diffusion, au sein de la francophonie, de recherches et d'opinions scientifiques sur les problématiques environnementales. **VertigO** privilégie la diffusion de savoirs critiques, de travaux et résultats de recherche et de dossiers d'actualité. La revue rejoint une grande diversité d'acteurs sociaux au sein de la francophonie qui oeuvrent en environnement.

La revue électronique en sciences de l'environnement VertigO désire répondre à quatre objectifs principaux : éduquer, former, informer et communiquer.

#### Éduquer en créant des liens avec les institutions d'éducation et de formation.

En collaboration avec les programmes universitaires, la revue permet la diffusion de travaux de recherche d'étudiants universitaires tout en offrant un support à la rédaction scientifique. Les publications étudiantes sont soutenues par des articles provenant de chercheurs seniors.

#### Former en offrant des stages d'immersion et une littérature scientifique francophone

La revue accueille des stagiaires dans le cadre de ses activités afin d'offrir une immersion dans le domaine de l'édition scientifique électronique. Les articles publiés servent de support académique. Enfin, VertigO désire, en partageant son expertise, favoriser la création de revues électroniques autonomes au sein de la francophonie.

#### Informer en diffusant des articles scientifiques et d'information

La revue accueille, sans barrière disciplinaire, des travaux provenant d'une grande variété de disciplines notamment des sciences sociales et de la nature, du droit, de la philosophie et des sciences de la santé. Ces travaux proviennent d'une grande diversité d'auteurs (universitaires, organismes non gouvernementaux en environnement, instituts de recherche indépendants, consultants privés) oeuvrant en sciences de l'environnement.

#### Communiquer en créant un lieu d'échanges accessible au plus grand nombre.

La revue travaille à l'émergence d'un réseau de revues électroniques en environnement afin de favoriser la rencontre d'un bassin critique de lecteurs, la création de forums et autres activités à caractère scientifique (séminaires électroniques, colloques, etc.).