

23^e SYMPOSIUM CANADIEN SUR LA TÉLÉDÉTECTION
10^e CONGRÈS DE L'ASSOCIATION QUÉBÉCOISE DE TÉLÉDÉTECTION
Université Laval, Sainte-Foy, Québec, du 20 au 24 août 2001

**CARTOGRAPHIE PAR SATELLITE DE LA RESSOURCE
ÉNERGÉTIQUE SOLAIRE AU QUÉBEC**

Gilles-H. Lemieux, Raymond Bégin, Daniel Bégin & André Arsenault
STAR/IMSAT, Laboratoire de télédétection, Université du Québec à Chicoutimi
555 boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, G7H 2B1
Téléphone : (418) 545-5011 ext. 5348 Télécopieur : (418) 545-5012 [gle-
mieux@uqac.quebec.ca](mailto:glemieux@uqac.quebec.ca)

Richard Perez, Atmospheric Sciences Research Center
State University of New York at Albany
CESTM, 251 Fuller Road, Albany, NY 12203, USA
Telephone : (518) 437-8751 Fax : (518) 437-8758/8711
perez@asrc.cestm.albany.edu

Résumé

L'équipe du Laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi poursuit des travaux sur la cartographie par satellite de l'ensoleillement du territoire québécois. Cette cartographie s'inspire du modèle de Richard Perez de l'ASRC de l'Université de New York à Albany. Les travaux sont réalisés dans le cadre du programme d'aide au développement des technologies de l'énergie du ministère des Ressources naturelles du Québec et grâce à l'appui de Robert Morris du Centre canadien de météorologie d'Environnement Canada.

L'objectif principal du projet vise à produire des cartes mensuelles et saisonnières du potentiel énergétique d'ensoleillement au Québec à partir des images multi-horaires du satellite géostationnaire GOES-8 et de comparer ces données à celles des stations terrestres de mesures d'Environnement Canada.

Les tests réalisés à l'aide de l'algorithme modifié pour le Québec ont démontré que les latitudes moyennes où se situe le territoire québécois par rapport à l'angle de visée des satellites géostationnaires (GOES) ne posent pas de problèmes majeurs d'application du modèle. De plus, une plus grande précision spatiale des plages d'ensoleillement est obtenue par rapport aux extrapolations parfois erronées des stations au sol.

Le laboratoire, déjà équipée d'une station de réception d'images NOAA depuis 7 ans, ajoute à ses installations une antenne de réception GOES en mode GVAR permettant l'acquisition de données en résolution spatiale de 1 km et spectrale de 10 bits (1 024 niveaux de gris) par pixel. Ceci permet d'augmenter la résolution spatiale et spectrale des cartes d'ensoleillement et du même coup de couvrir l'ensemble du territoire québécois.

La cartographie de la ressource énergétique solaire permet d'évaluer spatialement le potentiel d'utilisation d'énergie alternative plus particulièrement pour des sites éloignés ou inaccessibles, sans égard à la latitude. Cette cartographie exprimée en watts heure par mètre carré (wh/m^2) permet notamment de déterminer le potentiel utilisable pour le photo-voltaïque, le solaire passif, le solaire actif, la photosynthèse en foresterie, les stress hydriques versus l'indice d'inflammabilité des forêts, les périodes de gel radiatif en agriculture, le bilan d'ensoleillement pour l'industrie touristique, etc.

Problématique et objectifs

La littérature scientifique spécifie que les images prises par les satellites géo-stationnaires sont une source fiable pour obtenir des données d'irradiance solaire avec une couverture spatiale quasi continue (Muselli *et al.* 1998). Ainsi, les mesures colligées à partir d'un satellite offre l'opportunité unique d'un enregistrement simultanée de l'irradiance globale pour de vastes territoires avec une résolution satisfaisante dans le temps.

Il a également été observé que la résolution spatiale des cartes d'ensoleillement dérivées des satellites est supérieure à la résolution de l'interpolation fournie uniquement par un réseau de stations au sol. Cependant, lorsque les deux sources d'information sont disponibles, certains auteurs préconisent l'utilisation combinée des données satellitaires et des données du réseau de stations au sol pour cartographier l'irradiation solaire, surtout lorsque cette dernière varie beaucoup à l'échelle régionale (Zelenka *et al.* 1992).

Selon les travaux de Perez, il est préférable de se fier à une carte d'ensoleillement provenant d'une évaluation faite à partir de données satellitaires que d'une interpolation entre les stations, lorsque la distance entre ces dernières excède 20 à 25 km.

L'approche innovatrice du projet s'énonce par les objectifs suivants:

- 1) Permettre de développer une expertise dans le domaine de l'évaluation par télédétection du potentiel énergétique solaire au Québec avec des satellites adaptés aux réalités inhérentes au territoire. En effet, l'étendue du territoire québécois et son inaccessibilité rendent difficile voire impossible l'installation à grande échelle de stations de mesures au sol compte tenu des coûts d'installation et de fonctionnement.
- 2) Adapter et valider la méthode de l'ASRC (Atmospheric Science Research Centre) aux latitudes nordiques du Québec. La comparaison des résultats pour le territoire commun aux deux méthodes permettra cette validation.
- 3) Développer une expertise québécoise qui suscite déjà un intérêt auprès d'organismes canadiens dont le Laboratoire de recherche en diversification énergétique de Varennes qui a accepté de participer financièrement au projet.

Méthodologie

Pour effectuer la cartographie par satellite de la ressource énergétique solaire au Québec, le Laboratoire de télédétection a dû faire appel à un modèle de conversion des données satellisables en valeur d'irradiance au sol.

Description du modèle utilisé

Le modèle de Perez (Zelenka *et al.* 1998) a pour but d'évaluer l'ensoleillement par imagerie satellitaire. Ce modèle mesure l'irradiance au sol à partir de la radiance observée par le satellite. Cette radiance est proportionnelle à l'albédo planétaire. L'albédo est le cas particulier de la réflectance lorsque l'énergie reçue est l'énergie solaire et que les surfaces éclairées et réfléchissantes sont des surfaces terrestres ou planétaires (Bonn et Rochon 1996). Selon Cano (1986), les albédos minimums correspondent aux albédos du terrain par temps clair, sans nuage, et les albédos maximums correspondent aux albédos pour des couvertures nuageuses totales. On appellera albédo d'ennuagement l'albédo de la couverture nuageuse totale.

Le modèle utilisé repose sur l'hypothèse voulant que l'on puisse estimer un albédo pixelaire à partir de la radiance observée. Celle-ci doit être normalisée géométriquement, en fonction des conditions d'éclairement et d'observation, et corrigée par des facteurs évalués par le biais de la modélisation de l'interaction de l'irradiance avec l'atmosphère et le terrain. De la séquence temporelle immédiate des albédos pixellaires, on déduira le minimum le plus probable pour l'albédo du terrain.

Grâce à l'albédo d'ennuagement, constant à court terme et variable à long terme (dû à la dérive de la sensibilité du radiomètre du satellite), on inférera un indice d'ennuagement qui, modulant le facteur de transmission atmosphérique par ciel dégagé (Kasten *et al.* 1984), permettra d'évaluer l'éclairement global sur un plan horizontal pour un pixel donné et en un instant donné.

Principes de modélisation

Les techniques pour obtenir les valeurs d'irradiation au sol à partir des observations satellitaires reposent sur la relation quasi linéaire entre le flux de radiation extra-atmosphérique et l'irradiation au sol en fonction de la couverture nuageuse (Schmetz 1989). Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$\tau_{atm}(n) = \tau_{atm}(0) \times (1 - n) \quad (1)$$

$\tau_{atm}(n)$, transmittance atmosphérique pour un indice de couverture nuageuse, n ;
 $\tau_{atm}(0)$, transmittance atmosphérique pour un ciel dégagé;
 n , indice de couverture nuageuse.

La couverture nuageuse (forme, étendue, etc.) est caractérisée par un indice variant linéairement de 0 à 1. L'indice de couverture nuageuse (Cano *et al*, 1986) est donné par

$$n = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{toa,min}}{\alpha_{toa,max} - \alpha_{toa,min}} \quad (2)$$

n , indice de couverture nuageuse;
 α_{toa} , albédo planétaire instantané observé au-dessus de l'atmosphère (top of atmosphere (toa))
 $\alpha_{toa,min}$, valeur minimum observée pour l'albédo planétaire;
 $\alpha_{toa,max}$, valeur maximum observée pour l'albédo planétaire.

L'albédo planétaire est celui observé par le satellite.

Considérations géométriques

Du-dessus de l'atmosphère, le flux de radiation solaire en provenance du soleil est modulé par la variation de la distance terre-soleil au cours d'une année et par l'angle d'incidence avec la surface au sol :

$$I = \frac{I_0 \times \cos(z)}{R^2} \quad (3)$$

I , flux de radiation solaire arrivant du-dessus de l'atmosphère;
 I_0 , constante solaire, i.e., le flux de radiation normal au faisceau de radiation en provenance du soleil pour une distance moyenne terre-soleil, $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;
 z , angle zénithal apparent du soleil tel que vu du pixel observé;
 R , distance terre-soleil en unité astronomique.

Transmittance de l'atmosphère par temps dégagé

Le modèle de Kasten (Kasten *et al*. 1984) est utilisé pour représenter la transmittance de l'atmosphère (pour un ciel dégagé, $n = 0$) :

$$\tau_{atm}(0) = 0,84 \times \exp(-0,027 \times T_L \times m) \quad (4)$$

$\tau_{atm}(0)$, transmittance atmosphérique pour un ciel dégagé;

m , masse d'air optique relative (*relative optical air mass*);
 T_L , facteur de turbidité de Linke.

La masse d'air relative représente une mesure relative de la colonne d'air que parcourt le faisceau de radiation direct à travers l'atmosphère. Plus précisément, c'est le rapport entre la masse de la colonne d'air traversée par le faisceau de radiation et la masse d'une colonne d'air verticale pour un atmosphère standard (ciel dégagé, 25 km de visibilité, 1,45 cm de vapeur d'eau, aérosol typique des zones rurales).

L'absorption et la diffusion du rayonnement solaire, par temps dégagé, sont des phénomènes physiques complexes. Ils peuvent être modélisés par une théorie simplifiée du facteur de turbidité de Linke. Le facteur de turbidité de Linke est défini comme étant le nombre de couches atmosphériques, limpides et sèches, qu'il faut superposer pour obtenir la même atténuation du flux extra-atmosphérique que l'atmosphère réel contenant des aérosols. Le facteur de turbidité de Linke ne représente pas exclusivement la turbidité causée par les aérosols puisque ce dernier est aussi affecté par l'absorption de la radiation solaire dans les bandes visible et infra-rouge dû à la vapeur d'eau.

Indice de couverture nuageuse

L'indice de couverture nuageuse, n , est un quotient de l'albédo planétaire, α_{toa} . C'est pourquoi toutes les constantes de proportionnalité entre la radiance observée par le satellite, L_{sat} , et l'albédo planétaire, α_{toa} , sont annulées. En introduisant la mesure prise par le satellite, C_{sat} , on normalise pour les effets lambertiens CC , et on obtient pour l'indice de couverture nuageuse :

$$CC = \frac{C_{sat} \times R^2}{\cos(z)} \quad (5)$$

$$n = \frac{(CC - g_{min} \times CC_{min})}{(g_{max} \times CC_{max} - g_{min} \times CC_{min})} \quad (6)$$

n , indice de couverture nuageuse;
 z , angle zénithal du soleil;
 R , distance terre-soleil en unité astronomique;
 CC , estimé de l'albédo corrigé pour les effets lambertiens;
 CC_{min} , albédo minimum plausible, normalisé pour les effets non-lambertiens;
 g_{min}, g_{max} , corrections non-lambertiennes spécifiques aux conditions d'éclairement de CC .

On interprétera $g_{min} \times CC_{min}$ comme étant la meilleure prédiction de l'albédo de CC pour un ciel totalement dégagé de nuage. Si CC prend cette valeur, nous aurons alors $n = 0$,

qui est la valeur de l'indice de couverture nuageuse pour un ciel totalement dégagé de nuage (formulation mathématique). Un simple réaménagement de la formule (6) pour l'indice d'ennuagement

$$CC = n \times g_{\max} \times CC_{\max} + (1 - n) \times g_{\min} \times CC_{\min} \quad (7)$$

nous montre, que l'albédo du pixel (CC) est la fraction du ciel ennuagé (n) par l'albédo des nuages ($g_{\max} \times CC_{\max}$) auquel on ajoute la fraction du ciel dégagé ($1 - n$) par l'albédo du terrain par ciel dégagé ($g_{\min} \times CC_{\min}$).

Les mesures expérimentales retrouvées dans les travaux de Perez (1998), ont mis en évidence que les nuages sont statiquement de bons diffuseurs lambertiens. Ce qui lui permet de poser comme valeurs

$$\begin{aligned} g_{\max} &= 1 && \text{(i.e., pas de correction)} \\ CC_{\max} &= Cte \end{aligned} \quad (8)$$

CC_{\max} étant une constante (dérivant lentement avec l'âge du satellite).

Les corrections non-lambertiennes affecteront spécifiquement les albédos de terrains et se diviseront en deux composantes :

- Les effets de colonne d'air (*air mass effect*) variant avec l'élévation solaire.
- Les effets de rétro-diffusion variant avec l'angle entre l'éclairement et l'observation.

Effet de la colonne d'air par temps dégagé

Le modèle de Perez, s'inspirant des travaux de Lacis et Hansen (1974) sur la diffusion atmosphérique, propose une correction rendant compte de la variation, entre l'éclairement direct et diffus et l'angle d'éclairement solaire. On utilise des proportions de 15% et 85% pour l'éclairement diffus-direct pour l'éclairement à incidence normal. Invoquant l'équation de Kasten pour la transmission atmosphérique, Perez propose l'expression suivante:

$$g'_{\min} = 0,85 + 0,15 \times \frac{\{\cos(z) + \sin(z) \cdot \exp(0,04 \times [1 - m])\}}{\cos(z) \times \{\cos(z) + \sin(z)\}} \quad (9)$$

m , masse d'air optique relative (*relative optical air mass*);

g'_{\min} , facteur de correction, non lambetien, pour les effets de colonne d'air

z , angle zénithal du soleil;

Effet de rétro-diffusion

De la même façon que le comportement lambertien de la couverture nuageuse a été établie par l'analyse statistique des données, la fonction de rétro-diffusion a été déterminée par l'analyse de la distribution des minimums normalisés pour les effets lambertien versus ψ , l'angle entre les directions d'observation et d'éclairement. C'est ainsi qu'il a été choisi d'appliquer la correction suivante:

$$g''_{\min} = 1,0 + 0,7 \times \left[\frac{(50^\circ - \psi)}{50^\circ} \right]^2, \quad \psi < 50^\circ$$

$$g''_{\min} = 1, \quad \psi \geq 50^\circ \quad (10)$$

ψ , angle entre les directions d'observation et d'éclairement.

Il est à noter que cet effet est physiquement indépendant de celui de la colonne d'air. Grâce à la position privilégiée de GOES-8, par rapport à la zone de contrôle (NE USA), l'indépendance des deux effets a pu être corroborée à partir de leurs fluctuations diurnes. Cela renforce le choix de combiner ces deux effets en un seul facteur non-lambertien g_{\min} de la forme suivante:

$$g_{\min} = g'_{\min} \times g''_{\min} \quad (11)$$

g_{\min} , facteur de correction non lambertien;

g'_{\min} , facteur de correction, non lambertien, pour les effets de colonne d'air;

g''_{\min} , facteur de correction, non lambertien, pour les effets de rétro-diffusion.

Logistique opérationnelle

Tel que souligné dans la description du modèle utilisé, l'opération séquentielle requiert un processus de révision continue de l'estimation de l'albédo et ce, pour chaque pixel. À cette fin, il est nécessaire de maintenir une pile (*stack*) des valeurs CC / g_{\min} et ce, pour un intervalle de temps préalable d'une durée à optimiser. Ces valeurs permettront l'estimation, pour chaque pixel, d'un minimum (albédo), normalisé pour les effets non-lambertiens. Les évaluations de Perez ont montré que la valeur de l'intervalle de temps (contenue dans la pile) n'est pas critique. Une fenêtre de 4 à 5 jours en hiver et de 18 jours pour le reste de l'année s'avère un compromis éprouvé. La restriction de la fenêtre hivernale facilite le suivi associé à l'apparition parfois abrupte du couvert nivale. L'estimation statistique de CC_{\min} s'effectuera donc par l'évaluation de la moyenne des dix plus bas CC / g_{\min} de la pile courante.

Chaîne de traitement des données

Il découle naturellement des propos préalables que la chaîne de traitement devra se décomposer en un ensemble de traitements chronologiques de radiance de pixels; typique-

ment, d'images traitées séquentiellement pixel à pixel. On supposera qu'un traitement préalable a initialisé les piles historiques de $g_{\min} \times C_{\min}$.

Entrée des données:

Chaque pixel sera caractérisé par

- Sa radiance: valeur de l'image satellitaire.
- Ses coordonnées géographiques: long / lat
- Son temps d'acquisition: date et heure

Détermination de l'étalement des albédos.

Du temps, on déduit:

CC_{\max} (dérive du satellite)

De la pile, on estime CC_{\min} :

$$CC_{\min} = \frac{1}{10} \times \sum_{j=1}^{10} \frac{CC_j}{g_{\min}}$$

Où CC_j / g_{\min} sont les 10 plus petites valeurs

Normalisation lambertienne pour CC :

Linéarisation de la radiance [Produit GOES-8]

$$C = \frac{(C_{sat} \times C_{sat})}{256}$$

C_{sat} , radiance de l'image satellitaire

Évaluation des paramètres astronomiques

Du temps (T), on évalue la distance solaire, R.

Du temps et des coordonnées long/lat, on évalue z et ψ

z : l'angle zénithal solaire local

ψ : l'angle entre les directions d'éclairement et d'observation

Normalisation lambertienne

$$CC = C \times \frac{R^2}{\cos(z)}$$

Évaluation de l'irradiance globale

Calcul des corrections non-lambertiennes du pixel

De z , on calcule m et g'_{\min}

$$m = \left[\cos(z) + 0,50572 \times (6,07995 + (90 - z))^{-1,6364} \right]^{-1}$$

$$g'_{\min} = 0,85 + 0,15 \times \frac{\{\cos(z) + \sin(z) \times \exp(0,04 \times [1 - m])\}}{\cos(z) \times \{\cos(z) + \sin(z)\}}$$

De ψ , on évalue g''_{\min}

$$g''_{\min} = 1,0 + 0,7 \times \left[\frac{(50^\circ - \psi)}{50^\circ} \right]^2, \quad \psi < 50^\circ$$

$$g''_{\min} = 1, \quad \psi \geq 50^\circ$$

De ces deux dernières valeurs, on évalue g_{\min}

$$g_{\min} = g'_{\min} \times g''_{\min}$$

De CC , CC_{\min} et CC_{\max} , on évalue l'indice d'ennuagement

$$n = \frac{CC - g_{\min} \times CC_{\min}}{g_{\max} \times CC_{\max} - g_{\min} \times CC_{\max}}$$

D'une table climatologique représentant la variation annuelle du facteur de turbidité et du temps, on interpole une valeur pour T_L .

Évaluation finale de l'irradiance globale, G :

$$G = \frac{I_0 \times \cos(z)}{R^2} \times 0,84 \exp(-0,027 \times m \times T_L) \times (1 - n)$$

Mise à jour de la pile d'albédo avec les valeurs de CC / g_{\min}

Résultats et discussion

La cartographie

Le Laboratoire a produit pour le Québec des cartes mensuelles d'ensoleillement pour les douze mois des années 1998, 1999 et 2000. Ces cartes géocorrigées se présentent sous forme de choroplètes distribués selon une convention de gradation des couleurs allant des plus froides aux plus chaudes (du bleu au pourpre). Les plages de couleur représentent des classifications de pixels de dimension équivalente à 1/10 de degré en longitude et latitude, correspondant à des surfaces de 10 à 13 km par pixel.

La valeur d'énergie de chacune des classifications est exprimée en watt-heure par mètre carré. Le watt-heure a été retenu comme unité pratique adaptée à la gestion de l'énergie électrique. Trois types de vecteurs ont été appliqués sur les données matricielles de la cartographie par satellite de la ressource solaire: 1) la grille géographique en longitude de 55° à 83° ouest et en latitude de 40° à 60° nord apparaît en gris, 2) les limites territoriales des provinces et des états sont tracées en blanc et 3) le réseau hydrographique incluant rivières principales et grands lacs ou réservoirs s'expriment en bleu. On peut ainsi mieux localiser des zones d'intérêt particulier pour des utilisateurs potentiels de ces cartes. Une échelle graphique des distances et une légende comparative entre les mois de l'année en paliers de couleurs exprimant des niveaux de rayonnement solaire allant de 0 Wh/m² à 6 000 Wh/m² complètent la carte.

Validation avec les stations au sol

L'analyse comparative entre des mesures évaluées et des mesures observées permet de confirmer la validité du modèle. La comparaison des valeurs d'irradiance évaluées avec les valeurs d'irradiance observées aux stations pyranométriques permet de jauger deux facteurs. Le premier est la synchronisation temporelle des données et le deuxième l'intensité de l'irradiance, ces deux composantes constituant le profil de l'irradiance mensuelle. La majorité des stations présentent un jumelage étroit de la variation quotidienne de l'irradiance mesurée aux stations pyranométriques.

Des mesures plus objectives de la corrélation entre les valeurs évaluées et les valeurs observées nous sont données par les estimateurs statistiques suivants: l'erreur systématique moyenne (ESM) et l'erreur quadratique moyenne (EQM). Ces deux valeurs sont présentées en pourcentage par rapport à la valeur observée. L'ESM et l'EQM sont des moyennes de valeurs quotidiennes pour un mois. Elles sont calculées à partir des formules suivantes:

$$EQM = \frac{N}{\sum O} \sqrt{\frac{\sum (E - O)^2}{N}} \times 100\%$$

$$ESM = \frac{\sum (E - O)}{\sum O} \times 100\%$$

E et O étant respectivement le rayonnement solaire global estimé et observé pour une période d'un jour.

La comparaison entre les données surfaciques du satellite et les données ponctuelles des stations au sol ne sera jamais parfaite puisque d'une part nous obtenons l'ensoleillement moyen diurne d'une surface de 100 km² et l'ensoleillement diurne ponctuel d'une surface de quelques cm² d'autre part. De plus, les conditions d'ensoleillement qui prévalent autour d'une station au sol ne sont pas toujours représentatives de l'aire géographique régionale. La mesure évaluée par satellite offre certainement l'avantage d'être plus représentative des conditions prévalentes entre les stations au sol que celles qu'on peut prédire par interpolation. Nous invitons le lecteur à consulter l'article de Zalenka, Perez, Seals et Renné (Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly Irradiances) inclus en référence.

Conclusion et prospective

Quatre grandes conclusions s'imposent:

- 1) La cartographie solaire du Québec par données satellitaires multi-horaires GOES est possible et offre des résultats très prometteurs.
- 2) L'utilisation des données GOES en mode fin GVAR, à partir de notre propre station de réception, permettra de raffiner la cartographie.
- 3) Les données des stations au sol viennent corroborer parfaitement le modèle.
- 4) L'ajout d'informations de terrain modulées à partir des données NOAA viendra renforcer l'interface terrain-albédo-soleil par l'utilisation multi-plateforme de la télédétection.

Les données satellitaires offrent une distribution spatiale détaillée du territoire (pixel par pixel) alors que l'extrapolation des données ponctuelles au sol (station par station) donne un portrait généralisé de ce même territoire. L'utilisation de la cartographie de la ressource solaire au niveau du pixel offre un outil puissant aux gestionnaires de projets d'installation d'équipements de haute technologie (panneaux photo-voltaïques). De même, cette cartographie peut servir aux activités plus traditionnelles telles que l'agriculture, la foresterie, la météorologie, l'hydrologie, le tourisme d'aventure, etc., qui font appel à l'approche décisionnelle prise à l'aide de systèmes d'information géographique.

Ces cartes d'ensoleillement d'une moyenne sur trois ans de données donnent une information, jusqu'ici impossible à déterminer, sur la distribution du flux solaire à l'échelle du territoire. Ces données sont de première importance pour l'évaluation du potentiel de la productivité végétale et énergétique (panneaux photovoltaïques), autant pour les travaux de recherche en écologie végétale, en agriculture, en foresterie (assèchement et stress hydrique, récurrence des feux) que pour ceux sur les énergies renouvelables. Les retombées économiques des travaux de recherche appliquée déjà envisagés (ressources hydriques,

tourisme, océanographie, etc.) seront amplifiées par l'infrastructure dont se dotera l'Université du Québec à Chicoutimi. L'implantation prochaine souhaitée d'une station d'acquisition, de traitement et de transfert des données géospatiales rendra possible la mise à jour horaire, en temps quasi réel, de ces cartes pour tout le Québec, le Canada et même pour toute l'Amérique du Nord.

Références

Atmospheric Sciences Research Center, The University At Albany. 1998 .Production of Site/Time-Specific Irradiances from Satellite and Ground Data, Final Report 98-3, January 1998, prepared for The New York State Energy Research And Development Authority and The National Renewable Energy Laboratory.

Beyer H. G., Costanzo C., et Heinemann D. 1996. Modification of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy*, **56** : 207-212.

Bonn F. et Rochon G. 1996. Précis de télédétection: Volume 1 principes et méthode, Presse de l'université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, ISBN 2-7605-0613-4, 485 pages

Cano D., Monget J. M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., et Wald L. 1986. A method for the discrimination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, **37** : 31-39.

Environment Canada, Service de l'environnement atmosphérique. Analyse des données sur le rayonnement solaire pour le Canada 1967-1976: Volume 2, Québec, 1985, No. de catalogue En56-64/3-1984, ISBN 0-660-52688-3

Kasten F., Dehne K., Behr H. D. et Bergholter D. 1984. Spatial and temporal distribution of diffuse and direct solar radiation in Germany. Research Rept. No T 84-125 (in German), Federal Ministry of Research and Technology, 128 pp.

Koepke P. et Kriebel K. T. 1987. Improvements in the shortwave cloud-free radiation budget accuracy : I. Numerical study including surface anisotropy. *J. Climate Appl. Meteorol.*, **26** : 374-395.

Lacis A. A. et Hansen J. E. 1974. A parametrization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **31** : 118-133.

Moussu G., Diabaté L., Obrecht D. et Wald L. 1989. A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites. *Int. J. Remote Sensing*, **10** : 1207-1225.

Muselli, M., Poggi, M., Notton, G. et Louche, A. 1998. Improved procedure for stand-alone photovoltaic systems using Meteosat satellite images. *Solar Energy*, Vol. 62, No. 6, pp. 429-444

Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J. et Stewart R. 1990. Modeling daylight availability and irradiance component from direct and global irradiance. *Solar Energy*, **44** : 271-289.

Perez R., Seals R., Michalsky J., et Ineichen P. 1993. Geostatistical Properties and Modeling of Random Cloud Patterns for Real Skies. *Solar Energy*, **51** : 7-18.

Perez R., Seals R. et Zelenka A. 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, **60** : 89-96.

Schmetz J. 1989. Towards a surface radiation climatology : Retrieval of downward irradiances from satellites. *Atmospheric Res.*, **23** : 287-321.

Zelenka A., Perez R., Seals R. et Renné D. 1998. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical & Applied Climatology*