

# **CARTOGRAPHIE ET ANALYSE DU GISEMENT EOLIEN DU QUÉBEC PAR LE SYSTÈME WEST**

**RRSE.doc.6**

R-3526-2004

Expertise pour

[Regroupement pour la responsabilité sociale des entreprises](#) (RRSE)

Régie de l'Énergie du Québec

Drs Robert Benoit et Wei Yu  
Recherche en Prévision Numérique  
Environnement Canada  
Dorval, Québec  
Avril 2004

# INTRODUCTION

Le système WEST (Wind Energy Simulation Toolkit) a été développé par des chercheurs de Environnement Canada depuis 2001. Son but est de calculer la climatologie à haute résolution spatiale des vents pour les turbines éoliennes. Le résultat primaire concret de l'application de WEST est une carte de vitesse moyenne du vent (*wind map*) valide à une certaine altitude au-dessus du sol. La période de moyennage est typiquement plusieurs décades d'années, contrairement à une prévision météorologique du vent, qui serait valide à un instant précis, e.g. 1<sup>er</sup> janvier 2004 à 12 HNE. On appelle aussi une telle carte un Atlas Éolien; plus précisément, on dira un Atlas Éolien *numérique* pour distinguer cette nouvelle génération d'Atlas de l'ancienne. Cette dernière était basée directement sur les observations ponctuelles de vent (anémomètres, tours) et tentait directement d'interpoler celles-ci vers toute la région délimitée par ces stations de mesure. On peut citer comme exemples de l'ancienne génération le célèbre European Wind Atlas (Troen et Petersen, 1989) et l'Atlas WECTEC du Québec réalisé à l'UQAR (UQAR, 1996).

## 1. Base scientifique de la cartographie éolienne numérique WEST

La base scientifique de WEST est la méthode du *downscaling* statistique-dynamique (Frey-Buness et al., 1995) qui consiste à générer de l'information atmosphérique de plus petite échelle spatiale en utilisant des modèles de la dynamique des fluides et des statistiques sur les données atmosphériques de plus grande échelle (par exemple la circulation atmosphérique globale planétaire) ; le lecteur peut trouver deux diagrammes explicatifs aux liens suivants :

<http://lbs.hh.schule.de/klima/klimawandel/klimamodelle/modelle4.gif>

<http://www.cicese.mx/~tcavazos/downsc.jpg> .

Dans le cas de WEST, sur le plan dynamique, il s'agit plus spécifiquement d'une adaptation du mouvement atmosphérique à une spécification de plus fine échelle de la condition limite au sol, soit principalement l'orographie et la rugosité de la surface ; bien que WEST calcule sur toute la couche atmosphérique (troposphère et basse stratosphère), nous concentrons notre attention et nos efforts sur le traitement du 1<sup>er</sup> kilomètre au-dessus de la surface, communément appelé la couche limite planétaire, et encore plus sur la couche 0-200 m pour fin éolienne. Encore ici, les Danois ont joué un rôle de pionnier en produisant le premier Atlas numérique, celui de l'Irlande, en 1997 (Frank et Landberg, 1997), sur une maille de 10 km. Un autre exemple très impressionnant réalisé par le groupe du Laboratoire Riso, en collaboration, est la carte nationale du Danemark (<http://www.windpower.org/en/tour/wres/dkmap.htm> ) à une résolution de 200 m.

Avec WEST, nous choisissons ici comme base de données de la circulation atmosphérique globale, les réanalyses NCAR/NCEP (Kalnay et al. 1996) : celles-ci sont une représentation tridimensionnelle de l'état atmosphérique, à chaque 6 heures durant 1948 à 2000 et davantage, sur une maille de 2.5 degré (environ 250 km).

Les modèles fluides utilisés dans WEST sont

- le modèle méso-échelle MC2 (Benoit et al., 1997). Initialement conçu par le professeur A. Robert de l'UQAM, il a été repris par Environnement Canada au début des années '90 pour en faire un modèle capable de prévisions météorologiques opérationnelles. Il est généralement utilisé pour des problèmes de maille entre 1 et 50 km. A l'avant-garde par sa formulation mathématique-numérique, il est considéré comme le plus rapide au monde. Utilisé comme modèle d'échelle ultrafine (3km) durant la campagne Mesoscale Alpine Programme (MAP) en 1999 ( <http://www.map.ethz.ch/> ), il traite très bien les phénomènes dûs au relief et au contraste terre-eau. C'est un modèle Navier-Stokes complet avec prise en charge d'une vaste gamme d'effets diabatiques et turbulents. Le MC2 est capable d'auto-cascade, i.e. on peut d'abord calculer une solution sur une grille grossière et ensuite utiliser ces premiers résultats comme conditions aux limites et initiales d'un second calcul sur une grille plus fine (genre de méthode multi-grille).

- le modèle micro-échelle MsMicro (Walmsley et al. 1986). Aussi de conception canadienne, il permet de raffiner davantage la solution méso-échelle jusqu'à une maille de l'ordre de ~10 m. C'est un modèle dont la dynamique est linéaire, donc très rapide à calculer mais moins précis que le MC2. De plus, il se concentre sur la basse couche limite et ignore les effets de stratification thermique. Il représente assez bien les accélérations dues aux petits reliefs et les ajustements à la rugosité locale.

Il y a deux modes d'opération statistique pour la partie méso-échelle de WEST :

- le mode Éole : on fixe l'attention sur une seule maille des données globales. On analyse la longue série temporelle résultante et on en déduit les fréquences de réalisation de certains paramètres importants pour l'énergie éolienne, ainsi classifiés en états significatifs. Pour chaque état, on réalise un *downscaling* du vent au moyen de MC2. Le climat éolien méso-échelle est obtenu par la somme pondérée de tous ces *downscaling*. Ce mode est limité à des régions d'environ 500 km. Aussi, pour le moment, on ne sait y prendre en compte les phénomènes diabatiques (rayonnement solaire et infra-rouge, condensation, inversions de température près du sol). De plus l'aspect saisonnier y est flou.
- le mode Monte-Carlo : dans ce cas, on garde toute la puissance météorologique du MC2 – aucune limitation de dimension régionale, tout le diabatisme est préservé. Ici les états de grande-échelle sont simplement des échantillons 3D à date aléatoire (on prend soin d'équilibrer les saisons) des données globales. L'expérience passée avec WEST nous indique que avec 300 états, la précision des résultats finaux (e.g. vitesse moyenne méso-échelle) n'est pas pénalisée, au sens que les statistiques y ont convergé en-dessous du niveau des erreurs de modélisation de WEST.

Pour l'étude présente, nous avons choisi d'appliquer le mode Monte-Carlo, vue la grandeur de la région du Québec et pour plus de précision ; en effet nous avons pu vérifier que les écarts aux observations étaient ainsi plus petits qu'avec le mode Éole sur le sud du Québec.

## 2. Méthodologie spécifique

La cascade choisie avec le MC2 pour cette étude est la suivante :

- 30 km, 24 heures ; 141x121 points en horizontal
- 5 km, 6 heures à la fin du 24 h ci-dessus ; 231x231 points en horizontal

La projection géographique est Mercator sphérique avec pôle tourné pour être vraie au centre du Québec.

On découpe l'atmosphère de 0 à 20 km en 40 couches d'épaisseur variable ; les plus bas niveaux de vent sont à 65 et 200 m.

Les conditions au sol sont moyennées à la résolution de la grille du MC2 et proviennent, pour l'orographie et l'utilisation des sols, de la base de données USGS ( maille de 900 m). La Fig. 1 donne la topographie et la rugosité de surface (déduite de l'utilisation des sols uniquement) pour les deux grilles. On reconnaît bien le bouclier canadien, les Laurentides et les Appalaches ; aussi la forêt boréale, assez rugueuse, bordée au nord par la végétation basse de toundra (e.g. à la hauteur de la Baie de James). À 5 km, on distingue bien la plaine agricole de la Montérégie, avec une plus faible rugosité de 3 cm environ ; l'axe du Lac Champlain et le Saint-Laurent en amont de Montréal forment deux vallées bien résolues pour canaliser les vents modélisés (e.g. le vent *Suroît*) en Montérégie.

L'ensemble des 300 simulations est effectué sur les deux grilles puis les statistiques éoliennes sont calculées ; on fixe notre attention surtout sur les statistiques à 80 m d'altitude pour convenir aux grandes turbines éoliennes les plus récentes. Les statistiques de 80 m sont obtenues du 2<sup>ème</sup> niveau, celui à 200 m, par une extrapolation logarithmique utilisant la longueur de rugosité du modèle (Fig. 2).

### 3. Résultats de WEST

Les Fig. 2 et 3 montrent les champs de vitesse moyenne (sur 50 ans) calculés à 30 et 5 km respectivement. Ces cartes et toutes les suivantes sont en projection Polaire Stéréographique sur un Datum sphérique. Toujours on utilise un intervalle de couleur de 0.5 m/s ; les régions extérieures au Québec sont masquées. La paire de Figures 2 et 3 constitue aussi un bon exemple du concept de *downscaling* : les échelles calculées sont beaucoup plus fines sur le 5 km que sur le 30 km. On distingue une forte augmentation des vents (plus de 9 m/s) au nord du 55<sup>ème</sup> parallèle, au nord de la forêt boréale, et qui se poursuit jusqu'à l'Ungava. Les deux cartes confirment un maximum vers 53 Nord et un autre vers 57 Nord, moins facilement accessible. En allant vers le sud de 50 Nord, les valeurs baissent de plus en plus (e.g. 5 m/s dans l'Outaouais, Fig. 3.). La vallée du St-Laurent se distingue par des valeurs accrues, rive sud surtout, de la Gaspésie jusqu'au 45<sup>ème</sup> parallèle. Le trou de vent en Charlevoix se précise et diminue en superficie à 5 km. Le vent en mer sur le Golfe, atteint un maximum près de Rivière au Renard. Aussi, la plus vaste ressource éolienne n'est pas la Gaspésie, mais le moyen nord québécois.

Les résultats produits par WEST sont beaucoup plus vastes que la grille de vitesse moyenne, bien sûr le produit le plus en demande ! Vu que le système est tri-dimensionnel, on peut sortir des vents sur d'autres niveaux, faire des coupes verticales, etc. Les sorties ont été aussi interfacées avec les formats usuels dans le domaine de la géomatique (MapInfo, ArcInfo etc.) et permettent donc toute forme d'analyse imaginable. Les paramètres disponibles par WEST sont tous les moments de base (moyenne, variance, paramètres Weibull) ainsi que les paramètres reliés au flux d'énergie cinétique lui-même, communément appelé le *potentiel éolien* (Watt/m<sup>2</sup>). La distribution bi-variée vitesse / direction du vent en tout point des grilles est aussi disponible (requis pour la micro-échelle).

### 4. Précision de la méthode

Il importe de vérifier la précision des calculs de WEST affichés dans les Fig. 2-3. Pour cela on fait appel ici aux moyennes de vent à long terme de l'ensemble des stations anémométriques du territoire québécois disponible chez Environnement Canada ; elles nous ont été fournies par R. Morris, du ministère. On parle ici de mesures nominalement à 10 m au-dessus du sol et non de tours ou mâts spécialisés pour l'éolien. Comme c'est surtout les résultats de la grille 5 km qui nous importent, on se bornera à valider celle-ci. La Fig. 4 donne la position de toutes ces stations sur la région du 5 km. On distingue les stations principales, plus fiables, au nombre de 32 sur la région (39 en tout), dont les observations brutes sont des moyennes sur chaque 15 minutes, et les stations secondaires, au nombre de 133 sur la région (153 en tout), dont les observations brutes sont une moyenne sur la première minute de chaque heure. Ici nous avons accepté toutes les stations, sans égard à la qualité de leurs mesures, ni la longueur historique de leur enregistrement, ni la qualité de leur site (non-représentativité, obstacles, variation de la hauteur de l'anémomètre, etc.), ni connaissance de la rugosité locale du site. Les données d'observation pour les deux ensembles de stations sont reproduites respectivement aux Tables 1 et 2.

Pour faire la comparaison, nous avons interpolé les champs de vitesse moyenne du 5 km, à 80 m du sol, aux positions des stations, puis réduit les valeurs de 80 m à 10 m par un profil logarithmique basé sur la rugosité utilisée par le modèle à 5 km (Figure 1b). Comme les vents modèle s'éloignent sensiblement de ce profil théorique, la procédure est *peessimiste* ou conservatrice par rapport à la qualité des vents à 80 m, qui sont ceux qui importent vraiment pour l'aspect éolien. Idéalement, il faudrait utiliser des données sur mâts à 50 m disons, comme ceux de la côte gaspésienne. Nous avons fait une telle petite étude ailleurs (mât de Ste-Félicité) et l'accord de WEST est excellent (erreur de 0.1 m/s).

La correspondance WEST – observations est montrée en Fig. 5 pour les deux types de stations. Les points se groupent bien le long de la diagonale, mieux avec les stations principales : dans ce cas, l'erreur absolue moyenne est de 0.72 m/s et l'EQM est 0.87 m/s ; le coefficient de corrélation ( R ) y est de 0.67.

Une validation plus complète implique de faire tourner la partie micro-échelle de WEST, qui résout beaucoup mieux le voisinage immédiat des stations, et de refaire les variogrammes en question : cela devrait montrer un meilleur accord encore de WEST avec les observations.

Une autre étude de validation de WEST sur la Saskatchewan, l'est de l'Ontario et la Gaspésie est disponible sur demande auprès des auteurs.

## 5. Analyse des résultats

Pour la question du dossier énergétique du Québec et la prospective d'utiliser efficacement l'énergie éolienne comme source d'électricité, nous avons voulu être pratique et proposer des projets concrets. Alors nous avons superposé géomatiquement la carte de vent 5 km avec les lignes de transmission électriques connues du Québec : voir la Fig. 6. Il appert que plusieurs gisements éoliens importants sont situés à proximité des lignes de transmission, soit les grandes lignes du Nord, soit le réseau dense en Montérégie. Alors quatre cibles, numérotées de 1 à 4, ont été délimitées, avec des superficies "modestes" :

- cible 1, Charlevoix ;
- cible 2, La Grande ;
- cible 3, Montérégie rive sud ;
- cible 4, région de Manicouagan.

La valeur éolienne de chacun des gisements dépend de l'aire de terrain de chacune où le vent moyen dépasse un seuil choisi, par exemple 6.5 m/s. Nous avons analysé les points de maille du vent 5 km tombant dans chacune des cibles et établi des histogrammes de l'aire en fonction de la vitesse moyenne des points de la cible. Ceci est présenté en Fig. 7 pour les quatre cibles dans les deux rangées du bas. Par exemple, pour "La Grande", tout le spectre est au-dessus de 6.5, surtout dans l'intervalle 8-8.5 m/s avec une aire totale de 5297 km carré ! Chacune des autres cibles présente au moins 1000 km carré d'aire avec une vitesse moyenne au-dessus de 6.5 m/s. La rangée du haut montre un histogramme sur tout le Québec à gauche (30 km) et sur tout le sud de 55 Nord à droite (5 km) : les surfaces riches en vent sont **énormes**. Le double pic pour le 30 km est dû au maximum dans l'extrême nord. Ces résultats sur les aires sont analysés plus à fond dans l'autre annexe du présent mémoire, celle préparée par R. Reid.

Fluctuations inter-annuelles et saisonnières des gisements éoliens. Les fluctuations du gisement par rapport à la moyenne sont importants à examiner pour une analyse approfondie. Bien que WEST puisse calculer les deux, ici nous nous bornons à documenter la marche saisonnière du gisement sur les quatre cibles choisies afin de déterminer s'il y a complémentarité avec la variation saisonnière de la demande en électricité du Québec. La moyenne de la vitesse moyenne sur chaque cible a été calculée pour des sous-ensembles de l'échantillon climatique total de 300 dates : soit mensuel, soit saisonnier. Les résultats sont montrés en Fig. 8. Les courbes sont pour les saisons ; les points mensuels n'ont pas été interconnectés vu leur bruit statistique (faible taille d'échantillon). On distingue bien que la vitesse moyenne de chaque cible est sensiblement plus forte en hiver que en été ; la cible 2 se démarque vue sa plus grande vitesse moyenne et affiche aussi un maximum en automne et non en hiver, comme c'est le cas pour les 3 autres.

Variation verticale des gisements éoliens. Cet aspect est fort important et WEST permet de le bien traiter car il est basé sur une modélisation 3D, qui est beaucoup plus précise que les lois empiriques (e.g. la loi de puissance 1/7 fréquemment employé pour extrapoler des résultats à une autre altitude). La présente étude se concentre sur les vents de 80 m, mais toute autre élévation est facilement analysable sans remodeliser.

## 6. Projet de l'Atlas Canadien Éolien avec WEST

Environnement Canada a un projet en cours, de refaire un Atlas Éolien national complet en utilisant WEST. Cet Atlas sera sur une maille de 5 km homogène sur tout le pays et même

dans le nord (e.g. Terre de Baffin). Les résultats cartographiques et numériques seront publiquement accessibles sur un site web. Une 1<sup>ère</sup> version devrait être disponible dès l'automne 2004. La présente étude est une démonstration anticipée de ce que sera cet Atlas.

Dans le contexte de l'Atlas Éolien, nous avons développé le concept de niveau qui standardise la question de résolution spatiale ou taille des pixels des cartes. On définit un Atlas au :

- Niveau 0 : résolution de 25 km ;
- Niveau 1 : résolution de 5 km ;
- Niveau 2 : résolution de 1 km ;
- Niveau 3 : résolution de 200 m.

La version 1 de l'Atlas et la présente étude sont donc de Niveaux 0 – 1. Déjà, avec le Niveau 1, nous sommes en mesure de calculer un Niveau 3 directement en lui appliquant le modèle de micro-échelle. Nous sommes conscients que le Niveau 1 sert surtout à délimiter les gisements régionaux. Pour vraiment faire des études de sites approfondies, les Niveaux 2 - 3 sont requis.

En même temps que l'Atlas, Environnement Canada poursuit une mise en commercialisation (licence) du système WEST pour utilisation directe par l'industrie et le secteur éolien, dont le rôle sera de générer des cartes de Niveau 2 et 3 pour leurs clients.

Pour de grandes étendues, e.g. l'ensemble du Québec, le Niveau 2 requiert de grandes ressources de calcul accessibles chez Environnement Canada.

## 7. Relation avec les cartes publiées dans Le Devoir (2004)

Les 28 février et 4 mars dernier, Le Devoir publiait à la une des articles montrant des cartes de vent provenant de notre groupe à Environnement Canada. La 1<sup>ère</sup> a suscité beaucoup d'enthousiasme auprès des lecteurs en indiquant un énorme gisement au nord du 55<sup>ème</sup> parallèle. La 2<sup>ème</sup> montrait une carte de Niveau 3 pour les environs de Beauharnois.

Nous voulons ici simplement faire le lien de cette carte pan-québécoise avec les présents résultats. La carte du 28 février est un résultat plus ancien que WEST que nous avons calculé en nous appuyant sur les archives des prévisions météorologiques de Environnement Canada de 1995 à 2000 ; pour arriver à calculer un potentiel éolien (proportionnel au cube de la vitesse du vent) à 50 m d'altitude, il nous avait fallu appliquer des hypothèses assez fortes. Nous reproduisons cette carte du 28 février en Fig. 9a ; pour fin de comparaison la plus précise possible avec le résultat 30 km de la présente étude, nous avons calculé le potentiel éolien de la solution WEST 30 km (i.e. solution de la Fig. 2), mais évalué à 50 m d'altitude. La Fig. 9b montre la différence du WEST 30 km, en valeur absolue, avec la solution préliminaire de la Fig. 9a. L'intervalle de contour couleur a été choisi intentionnellement à 50 W/m<sup>2</sup> ; cette valeur correspond à une demie classe standard de potentiel (voir [http://www.bergey.com/Maps/Wind\\_Classes.htm](http://www.bergey.com/Maps/Wind_Classes.htm) ). La majeure partie du Québec donne une différence de moins de une classe standard à 50 m d'altitude.

Ce qui en ressort, c'est que la carte du Devoir du 28 février donne la distribution générale correcte (Nord plus fort que le sud, transition au 52<sup>ème</sup> Nord, etc.). La seule exception est la région au sud de la rivière La Grande, qui était fortement sous-estimée par la solution préliminaire. En effet on a déterminé plus haut que WEST, dans la présente étude sur le Québec, n'est pas biaisé par rapport aux observations.

## 8. WEST à la micro-échelle

La présente étude a exploité essentiellement la composante méso-échelle de WEST, qui est la plus importante et la plus coûteuse en calcul. Il a été mentionné plus haut dans la section 4 qu'une validation plus poussée devrait utiliser les vents de micro-échelle pour comparer avec

les observations *in situ*. Aussi, le Niveau 3 de l'Atlas est essentiel pour finaliser le *micrositing* de fermes éoliennes (de même qu'une campagne de mesures sur mâts de l'ordre de un an).

À titre de démonstration de la capacité micro-échelle de WEST, nous présentons en Fig. 10, une carte préliminaire des vents moyens à l'altitude de 50 m de Niveau 3 pour le sud du Québec, le long de l'axe Cornwall-Québec, des Laurentides jusqu'aux Appalaches. La maille y est de 200 m ; noter que la barre de couleur est libellée en unités de 10 m/s et non de m/s. Elle permet de voir plus en détail la Cible 3 et 1 (en partie). Bien d'autres détails y apparaissent aussi !

Pour être fait d'une façon optimale, le Niveau 3 requiert l'accès aux données du territoire des bases de données provinciales du Québec.

## EN RÉSUMÉ

Une nouvelle cartographie de la moyenne à long-terme des vents sur le Québec a été établie grâce au nouveau système d'Atlas Éolien numérique WEST. Les points saillants de la présente expertise sont :

- Les statistiques établies représentent une période de 52 ans. Elles portent sur l'altitude de 80 m pour l'éolien. Deux cartes sont établies : une à 30 km sur tout le Québec et une à 5 km sur le *sud* du Québec.
- La carte de vent principale est celle sur une maille de 5 km, couvrant tout le sud du Québec, jusqu'à 54 N environ. Elle montre un gisement très fort au sud de la région de La Grande, augmentant vers l'Est jusqu'au Labrador.
- On peut déceler plusieurs excellents gisements éoliens situés sous les grandes lignes de transmission électrique d'Hydro-Québec. Le moyen Nord (48-52 N) recèle un gisement beaucoup plus riche que la Gaspésie.
- Les résultats de WEST sont validés avec les données anémométriques de vent du territoire québécois, nominalement à 10 m d'altitude : avec les stations principales, l'erreur absolue moyenne de la partie méso-échelle à 5 km de WEST est de 0.72 m/s.
- Quatre cibles spécifiques d'intérêt sont identifiées, dont les aires varient de 1 500 à 6 500 km<sup>2</sup>, soit la Montérégie, Charlevoix, Manicouagan et la Grande. On en a analysé la superficie en fonction de la vitesse moyenne locale. Chacune a au moins 1000 km<sup>2</sup> au-dessus de 6.5 m/s; la cible La Grande est très venteuse avec elle 5297 km<sup>2</sup> dans cette gamme et une moyenne autour de 8.5 m/s.
- L'analyse des superficies venteuses a été faite aussi pour l'ensemble des domaines modélisés sur le Québec et donne des potentiels éoliens bruts **énormes** : 300 000 km<sup>2</sup> dans le domaine 5 km et 1 000 000 km<sup>2</sup> dans le domaine 30 km dépassent le 6.5 m/s !
- La marche annuelle des vitesses moyennes sur les cibles choisies donne un gisement maximal en hiver-printemps dans le sud et en automne-hiver pour La Grande.
- La carte préliminaire dans le Devoir du 28 février 2004 était essentiellement correcte, sauf la région au sud de la rivière La Grande, qui y était fortement sous-estimée.
- Un exemple de résultat WEST à la micro-échelle (200 m) pour le sud du Québec est montré.

## Bibliographie

- Benoit, R., Y. Chartier, M. Desgagné, S. Desjardins, P. Pellerin, S. Pellerin. The Canadian MC2 : a semi-lagrangian, semi-implicit wideband atmospheric model suited for finescale process studies and simulation. *Monthly Weather Review*, 125 : 2382-2415, 1997.
- Frank, H. P., L. Landberg. Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorology*, 85 : 359-378, 1997.
- Frey-Buness, F. , D. Heimann, R. Sausen. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 50 : 117-131, 1995.
- Fuentes, U. , D. Heimann. Verification of statistical-dynamical downscaling in the Alpine region. *Climate Research*, 7 : 151-168, 1996.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *BAMS*, 77, 437–471.
- Mortensen, N. G. , D. N. Heathfield, L. Landberg, O. Rathmann, I. Troen, E. L. Petersen. Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 7 Help Facility, 2002. *RISØ National Laboratory*. Roskilde, Denmark. 300 topics. ISBN 87-550-2941-8.
- Troen, I. , E. Lundtang Petersen. European Wind Atlas. ISBN 87-550-1482-8. *RISØ National Laboratory*, 656 pp, 1989, Roskilde, Denmark.
- UQAR, 1996: L'Énergie au service du Québec. Bibliothèque nationale du Québec ISBN-2-550-30832-8. Publication no RN96-4014.
- Walmsley, J., P. Taylor, and T. Keith, 1986: A simple model of neutrally stratified boundary-layer flow over complex terrain with surface roughness modulations (MS3DJH/3R). *Boundary-Layer Meteorology*, 36, 157–186.

Table 1. Comparaison WEST (5 km) et stations principales

ID	Nom	Lat	Lon	Obs (m/s)	WEST (m/s)
1	DUCHESNAY	46.87	-71.65	2.50	2.82
2	JOLIETTE VILLE	46.02	-73.43	2.86	4.07
3	LAC ST PIERRE	46.17	-72.92	5.39	5.19
4	L'ASSOMPTION	45.82	-73.43	3.14	4.29
5	ST AUGUSTIN	46.73	-71.5	3.94	3.26
6	VALCARTIER FES	46.95	-71.5	1.47	2.71
7	LENNOXVILLE	45.37	-71.82	2.39	2.34
8	MONTREAL ICE CONTROL	45.47	-73.5	4.94	3.43
9	MONTREAL MCGILL	45.5	-73.58	3.14	2.92
10	MONT ST HILAIRE MCGILL	45.55	-73.17	2.64	3.28
11	STE ANNE DE BELLEVUE	45.43	-73.93	3.58	3.14
12	STE CROIX	46.62	-71.78	3.53	2.60
13	SAWYERVILLE NORD	45.37	-71.53	3.50	2.31
14	SHERBROOKE	45.4	-71.9	3.19	2.65
15	MANIWAKI UA	46.3	-76.01	2.19	2.51
16	BAIE COMEAU CBA	49.22	-68.15	3.61	4.85
19	CAP TOURMENTE	47.07	-70.78	3.64	3.40
20	FORET MONTMORENCY	47.32	-71.15	1.94	2.93
23	CAPLAN	48.1	-65.68	5.22	4.22
24	GRANDE RIVIERE	48.38	-64.53	4.56	5.40
26	LA POCATIERE CDA	47.35	-70.03	4.33	4.65
27	RIVIERE AU RENARD	49.02	-64.4	5.56	7.10
28	ARVIDA	48.43	-71.17	3.44	3.68
29	LAC BOUCHETTE	48.22	-72.17	4.31	2.68
30	NORMANDIN CDA	48.85	-72.53	3.86	4.32
31	PARENT	47.92	-74.62	2.69	2.66
32	AMOS	48.57	-78.13	3.00	3.34

Table 2. Comparaison WEST (5 km) et stations secondaires.

ID	Nom	Lat	Lon	Obs (m/s)	WEST (m/s)
101	BEAUPORT	46.84	-71.2	4.42	2.76
102	DESCHAMBAULT	46.69	-71.97	2.28	2.67
103	ILE D'ORLEANS	47	-70.81	5.72	5.37
104	L'ASSOMPTION	45.82	-73.43	3.06	4.29
105	PARC DES LAURENTIDES	47.56	-71.23	2.53	3.86
106	QUEBEC A	46.8	-71.38	4.14	3.32
107	SHAWINIGAN	46.56	-72.73	2.81	3.20
108	TROIS-RIVIERES	46.35	-72.52	3.78	3.06
109	TROIS-RIVIERES A	46.35	-72.68	3.22	2.93
110	VALCARTIER	46.9	-71.5	2.44	2.93
111	VALCARTIER A	46.9	-71.5	2.19	2.93
112	VALCARTIER A	46.9	-71.5	2.64	2.93
113	BEAUCEVILLE	46.21	-70.79	2.25	2.62
114	VILLEROY (STE-FRANCOISE)	46.3	-72.06	2.47	2.75
115	ILE AUX GRUES	47.07	-70.53	5.36	5.68
116	LAC SAINT-PIERRE	46.18	-72.92	5.06	5.21
117	STE-FOY (U. LAVAL)	46.78	-71.29	2.94	3.05
118	LEMIEUX	46.32	-72.06	2.97	2.70
119	BEAUHARNOIS	45.17	-73.92	4.92	4.50
120	FRELIGHSBURG	45.05	-72.83	2.56	2.39
121	ILE CHARRON	45.58	-73.49	4.22	4.32
122	VARENNES	45.72	-73.38	3.89	4.10
123	LENNOXVILLE	45.37	-71.82	2.92	2.34
124	MCTAVISH	45.51	-73.58	1.94	2.93
125	MONTREAL ADAC A	45.48	-73.55	4.83	3.08
126	MONT-ORFORD	45.31	-72.24	5.97	2.93
127	MONTREAL/DORVAL INT'L A	45.47	-73.75	4.11	4.33
128	MONTREAL-EST	45.63	-73.55	3.39	3.67
129	NICOLET	46.23	-72.66	3.33	4.80
130	STE-CLOTHILDE	45.17	-73.68	2.81	3.00
131	ST-HUBERT A	45.52	-73.42	4.39	4.32
132	ST LAMBERT	45.5	-73.52	3.08	2.77
133	SHERBROOKE A	45.43	-71.68	2.72	2.24
134	VALLEYFIELD (ECLUSE)	45.23	-74.1	5.19	4.25
135	COTE-STE-CATHERINE	45.42	-73.57	3.58	4.21
136	LAC MEMPHREMAGOG	45.27	-72.17	3.17	2.96
137	STE-ANNE-DE-BELLEVUE 1	45.43	-73.93	3.36	3.14
138	ST-ANICET 1	45.12	-74.28	3.22	2.97
139	L'ACADIE	45.29	-73.35	3.47	4.92
140	LAUZON (AUT)	46.83	-71.16	4.58	3.02
141	GATINEAU A	45.52	-75.57	2.94	2.52

142	MANIWAKI UA	46.3	-76.01	2.00	2.51
143	MANIWAKI AIRPORT	46.27	-75.99	2.36	2.66
144	MONTREAL/MIRABEL INT'L A	45.67	-74.03	2.94	3.88
145	STE AGATHE DES MONTS	46.05	-74.28	2.92	2.86
146	ST-JOVITE	46.08	-74.56	1.47	2.56
147	BAIE-COMEAU A	49.13	-68.2	4.39	5.84
151	CAP-ROUGE	48.37	-70.54	5.67	2.69
152	CHARLEVOIX A	47.6	-70.23	3.86	2.41
153	CHARLEVOIX (MRC)	47.28	-70.64	2.69	2.73
155	COROSSOL	50.08	-66.38	6.36	5.92
156	CAP-TOURMENTE	47.08	-70.78	2.78	3.06
157	GAGNON A	51.95	-68.13	3.72	5.11
163	ILE AUX PERROQUETS	50.22	-64.21	6.42	6.55
164	ILE ROUGE	48.07	-69.56	6.56	6.15
165	LONGUE-POINTE-DE-MINGAN	50.27	-64.23	2.56	5.19
166	MANICOUAGAN A	50.65	-68.83	2.53	2.91
167	MINGAN A	50.28	-64.13	4.42	5.52
169	POINTE DE L'ISLET	48.14	-69.72	5.08	4.48
170	POINTE CLAVEAU	48.26	-70.11	5.08	2.60
171	SEPT-ILES A	50.22	-66.27	4.44	4.11
173	POINTE-DES-MONTS	49.32	-67.38	5.25	5.64
174	POINTE NOIRE CS	50.16	-66.43	3.58	5.58
175	BAIE-COMEAU	49.26	-68.15	4.89	3.30
176	AMQUI	48.47	-67.43	3.22	4.97
177	CAP-D'ESPOIR	48.42	-64.32	4.78	7.32
178	CAP CHAT (AUT)	49.08	-66.73	7.28	5.26
179	CAP-MADELEINE	49.25	-65.33	5.61	7.13
180	GASPE A	48.78	-64.48	3.25	3.20
184	LA POCATIERE	47.36	-70.03	4.28	5.02
185	MONT-JOLI A	48.6	-68.22	5.25	5.50
186	NEW CARLISLE 1	48.01	-65.33	3.64	5.91
187	POINTE-AU-PERE (INRS)	48.51	-68.47	4.75	4.72
188	PORT MENIER	49.82	-64.35	5.75	5.05
189	PORT MENIER	49.85	-64.45	4.89	3.48
190	PORT-MENIER	49.84	-64.29	3.61	3.82
191	RIVIERE AU RENARD	49.02	-64.4	5.69	7.09
192	RIVIERE DU LOUP	47.8	-69.55	3.92	4.42
193	RIVIERE-DU-LOUP	47.81	-69.55	2.67	4.50
195	ILE BICQUETTE	48.42	-68.89	6.92	6.05
196	CAP-CHAT	49.11	-66.65	5.28	6.73
197	BAGOTVILLE A	48.33	-71	4.22	3.58
198	BONNARD 1	50.73	-71.02	3.36	4.48
199	CHAMOUCOUANE	49.28	-73.36	1.19	2.83
200	CHUTE-DES-PASSES	49.84	-71.17	2.50	2.55

201	JONQUIERE	48.42	-71.15	3.89	3.58
202	MISTOOK	48.6	-71.72	3.83	4.13
203	NORMANDIN	48.84	-72.55	3.94	4.18
204	ONATCHIWAY	48.89	-71.03	2.36	2.85
205	ROBERVAL A	48.52	-72.27	4.08	3.19
206	ST-HENRI	48.65	-71.85	3.64	5.27
207	ST-GEDEON	48.48	-71.78	4.11	5.13
208	LAC BENOIT	51.53	-71.11	3.50	5.24
209	MANOUANE EST	50.66	-70.53	3.33	4.93
210	LA BAIE	48.3	-70.92	3.47	3.33
211	PARENT	47.92	-74.62	2.03	2.66
212	LA TUQUE	47.41	-72.79	2.47	2.43
213	BARRAGE ANGLIERS	47.55	-79.24	3.08	3.05
214	BARRAGE TEMISCAMINGUE	46.71	-79.1	2.61	2.88
215	ROQUEMAURE	48.63	-79.46	2.89	4.80
216	ROUYN	48.25	-79.03	3.64	3.27
217	ROUYN A	48.22	-78.83	3.42	2.99
218	CHAPAIS	49.78	-74.87	3.44	3.24
219	CHAPAIS	49.82	-74.98	2.03	2.89
220	CHIBOUGAMAU-CHAPAIS A	49.77	-74.53	3.06	4.12
221	CHIBOUGAMAU A	49.82	-74.42	3.31	5.34
222	CHIBOUGAMAU CHAPAIS A	49.77	-74.53	3.39	4.12
223	EASTMAIN A	52.23	-78.52	4.58	5.50
224	LA GRANDE RIVIERE A	53.63	-77.7	4.14	5.80
225	LA GRANDE III A	53.57	-76.2	4.03	4.97
226	LA GRANDE IV A	53.76	-73.68	3.33	6.16
227	MATAGAMI A	49.77	-77.8	3.69	2.69
228	MATAGAMI A	49.77	-77.82	3.36	2.77
229	NEMISCAU A	51.7	-76.12	4.00	4.07
230	NITCHEQUON	53.2	-70.9	4.39	6.19
231	VAL-D'OR A	48.05	-77.78	3.50	2.75
232	WASKAGANISH A	51.48	-78.75	4.58	3.53
233	WEMINDJI A	53.02	-78.83	4.69	5.44

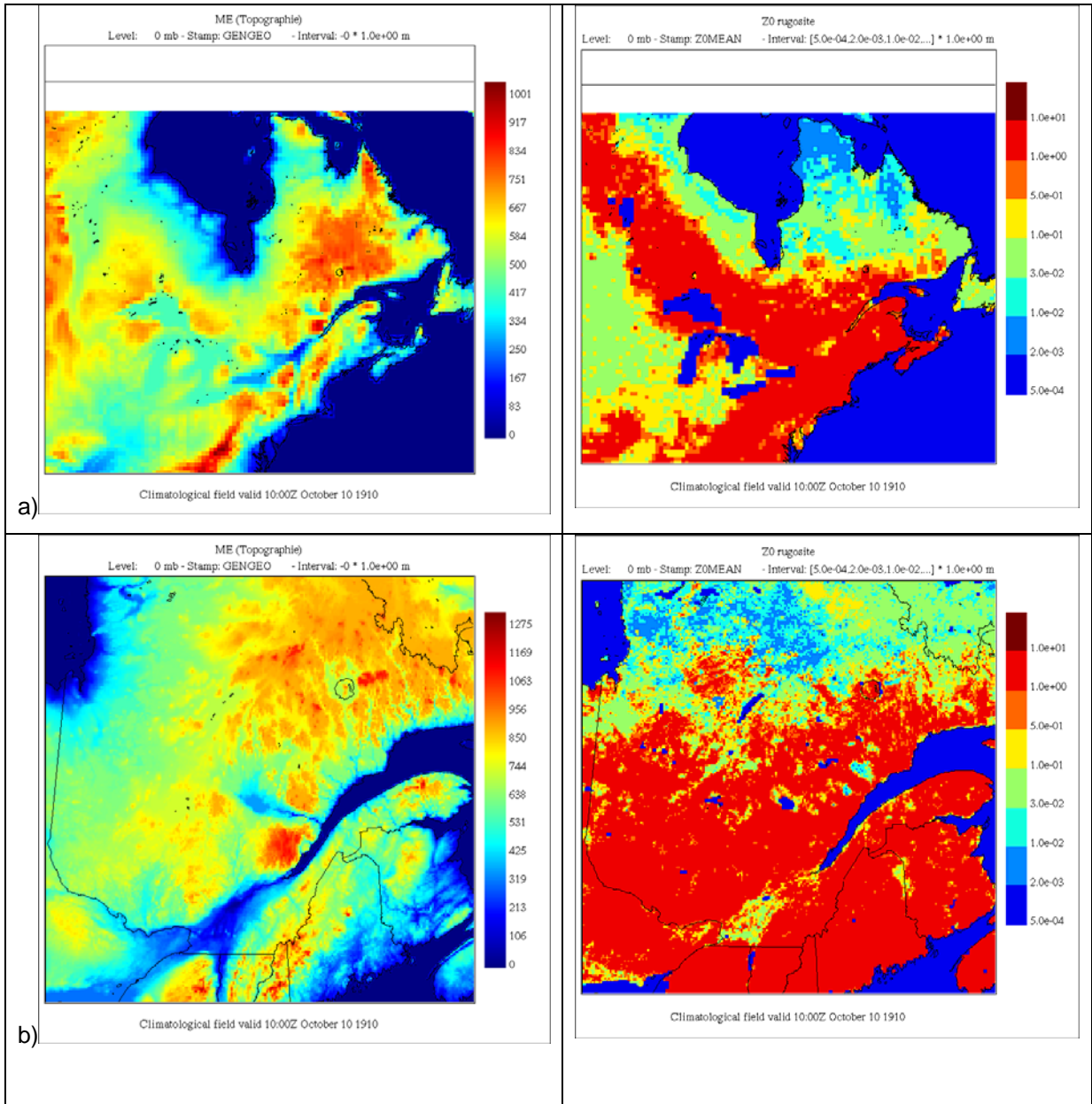


Fig. 1. Spécification des conditions au sol dans WEST : élévation et rugosité. a) domaine à 30 km; b) domaine à 5 km. L'élévation, en mètre, est en couleurs continues tandis que la longueur de rugosité (i.e. le paramètre micrométéorologique  $z_0$ ), en mètre aussi, est analysé selon une échelle logarithmique faisant ressortir les variations naturelles.

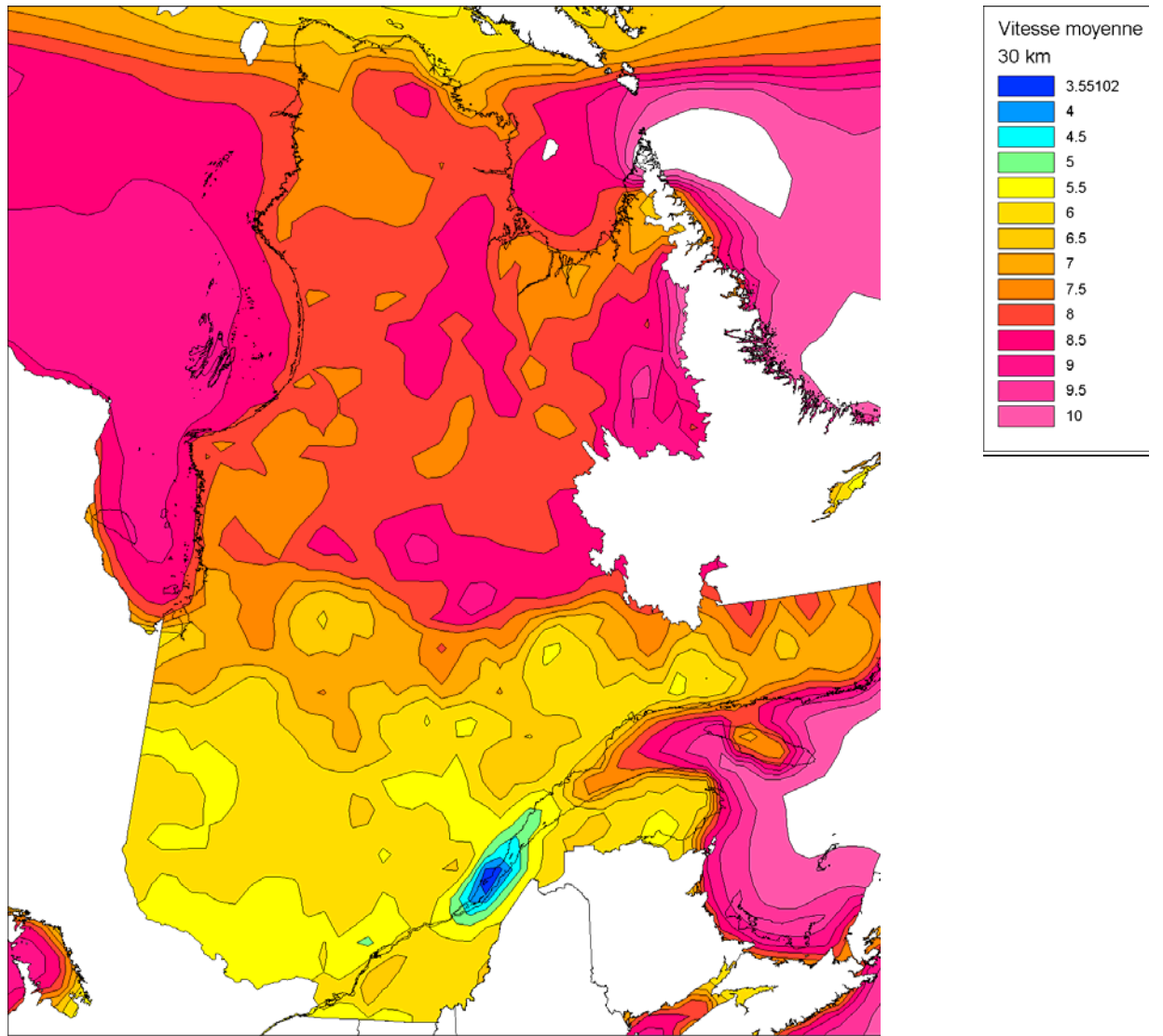


Fig.2. Vitesse moyenne sur l'ensemble du Québec, modélisation WEST à 30 km de maille. Évalué à 80 m au-dessus du sol. Intervalle de contour de 0.5 m/s.

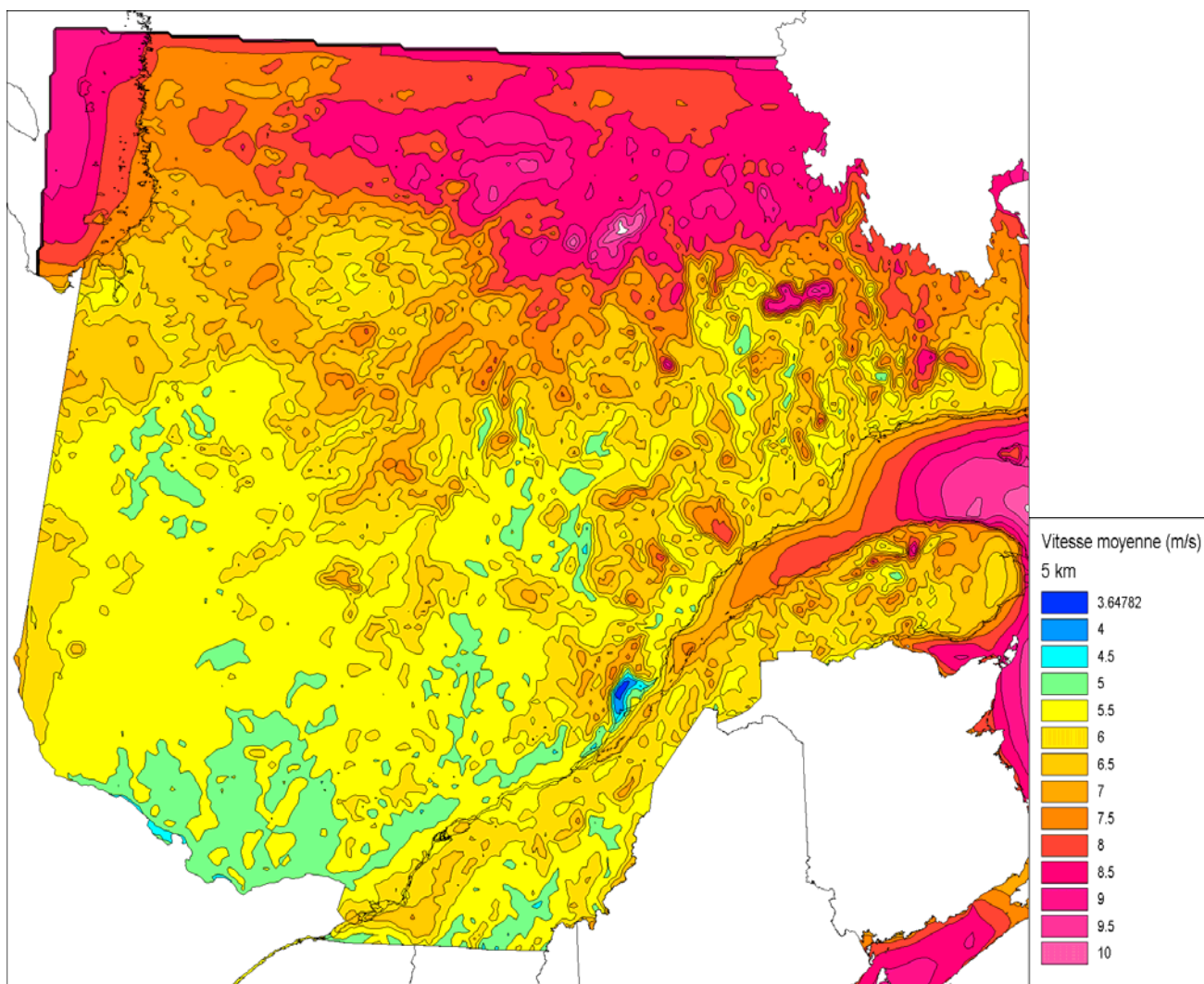


Fig. 3. Vitesse moyenne sur le sud du Québec, modélisation WEST à 5 km de maille. Évalué à 80 m au-dessus du sol. Intervalle de contour de 0.5 m/s; même choix de couleurs que pour la Fig. 2.

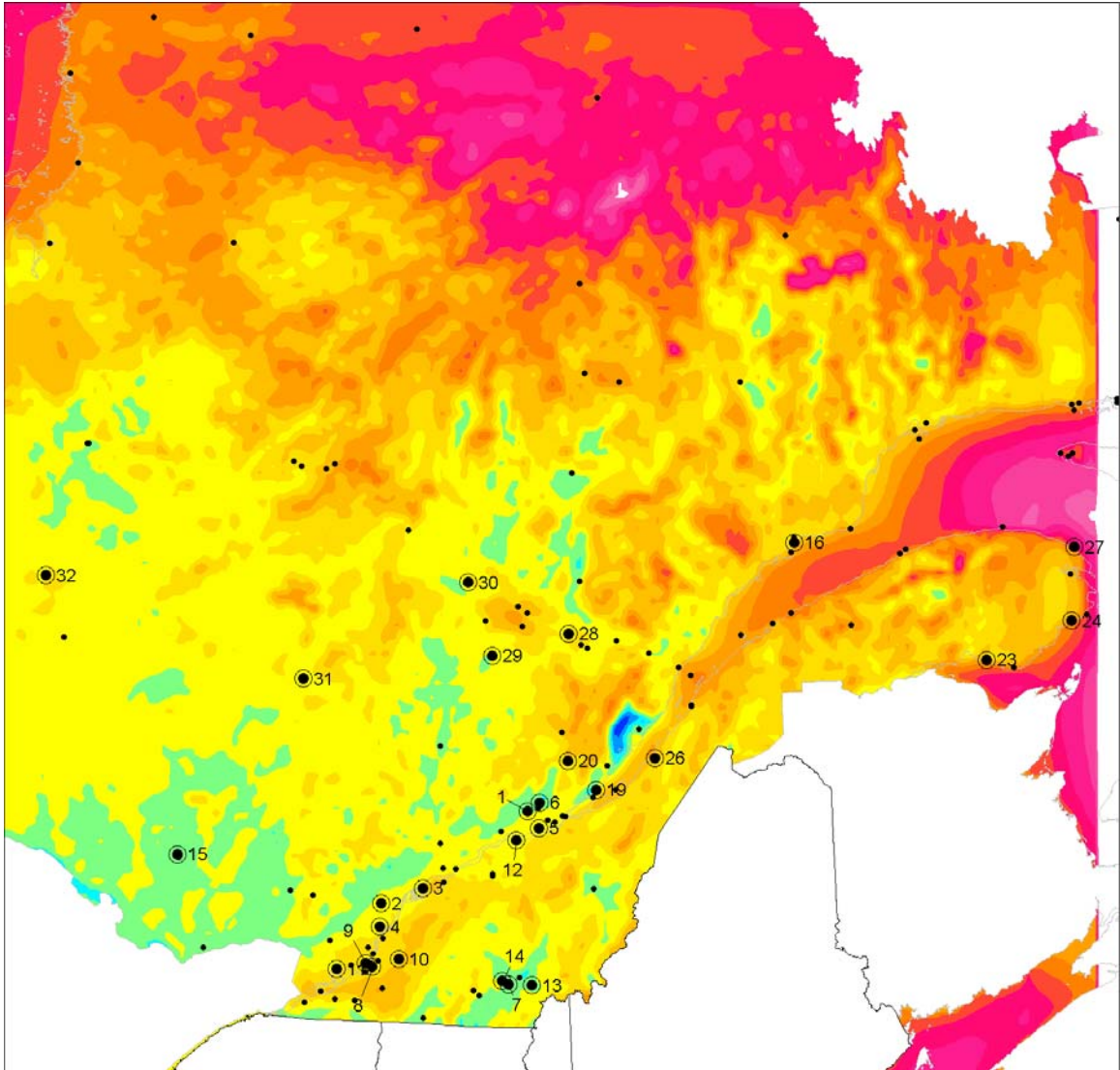


Fig. 4. Stations de mesure de vent qui sont disponibles pour la validation des cartes de WEST. Stations principales (doubles cercles, numérotés comme dans la Table 1) et stations secondaires (simples cercles).

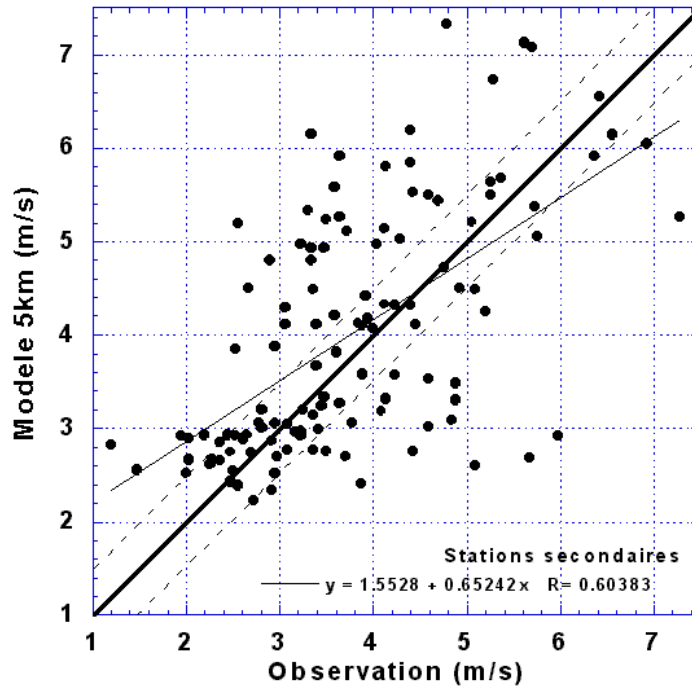
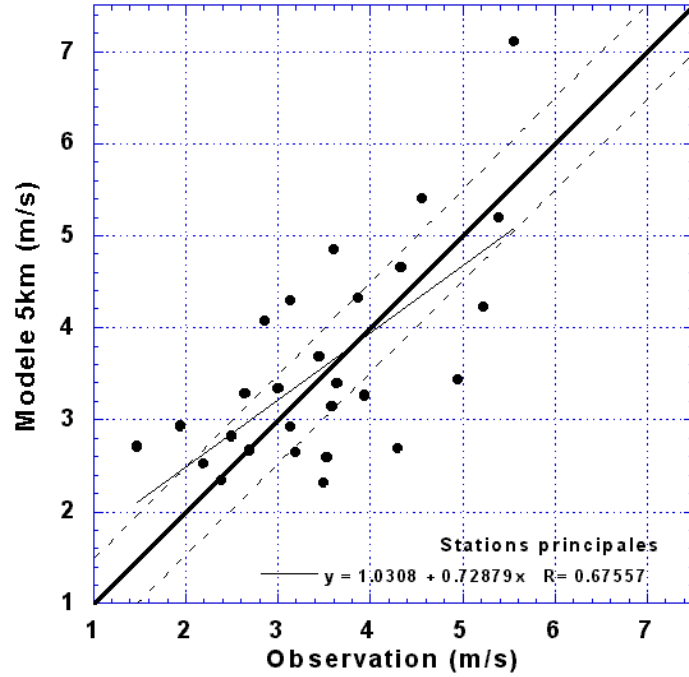


Fig. 5. Variogrammes des résultats WEST versus les observations. a) 5km vs stations principales (erreur absolue moyenne, EAM =0.72 m/s, erreur quadratique moyenne, ERMS =0.87 m/s; b) 5km vs stations secondaires : EAM=0.86 m/s, ERMS=1.12 m/s.

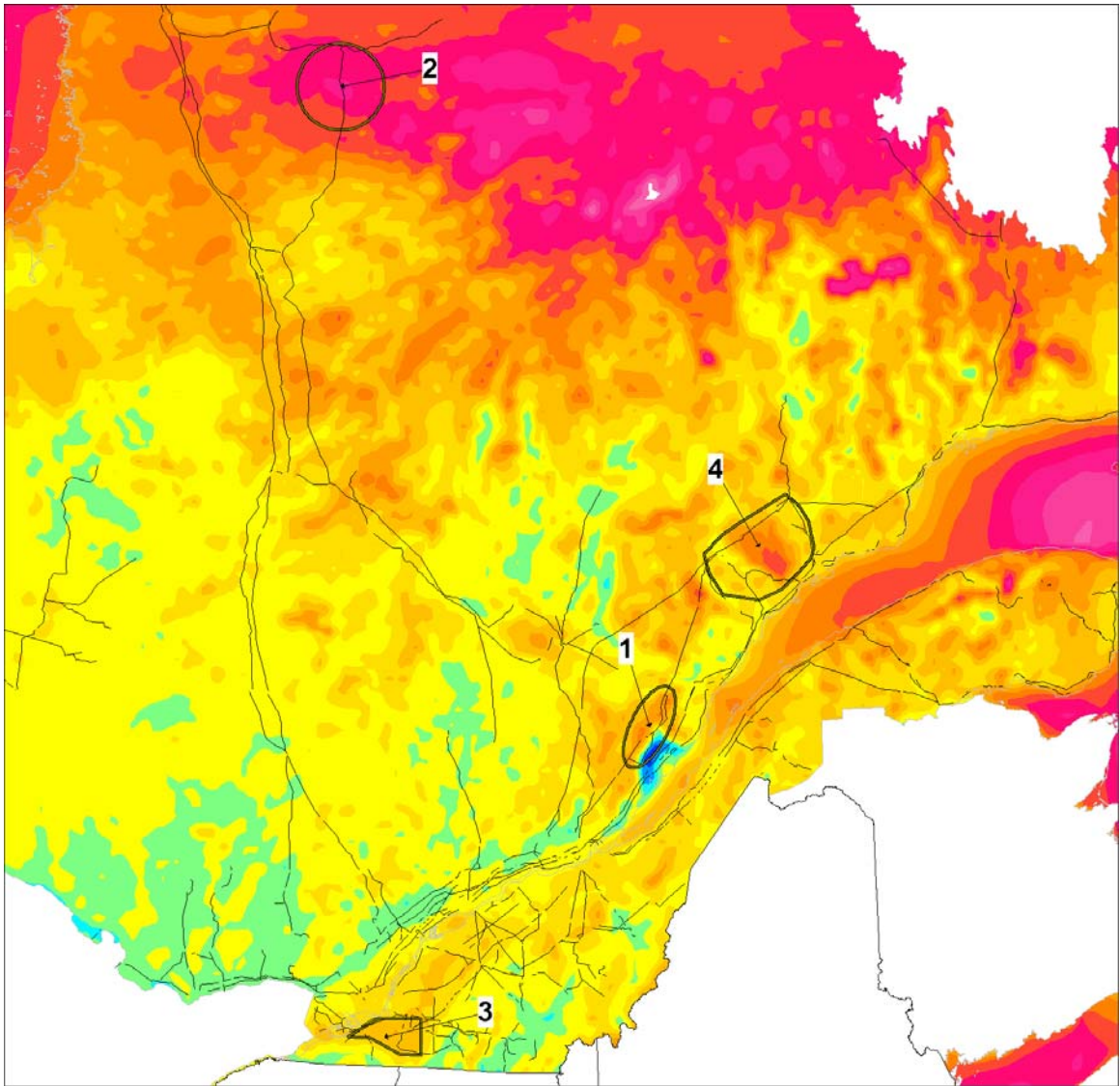


Fig. 6. Superposition des principales lignes de transmission électrique et des 4 cibles d'analyse choisies sur la carte des vents de 5 km : les contours noirs de vitesse sont ôtés pour la lisibilité, même échelle que dans Fig. 2.

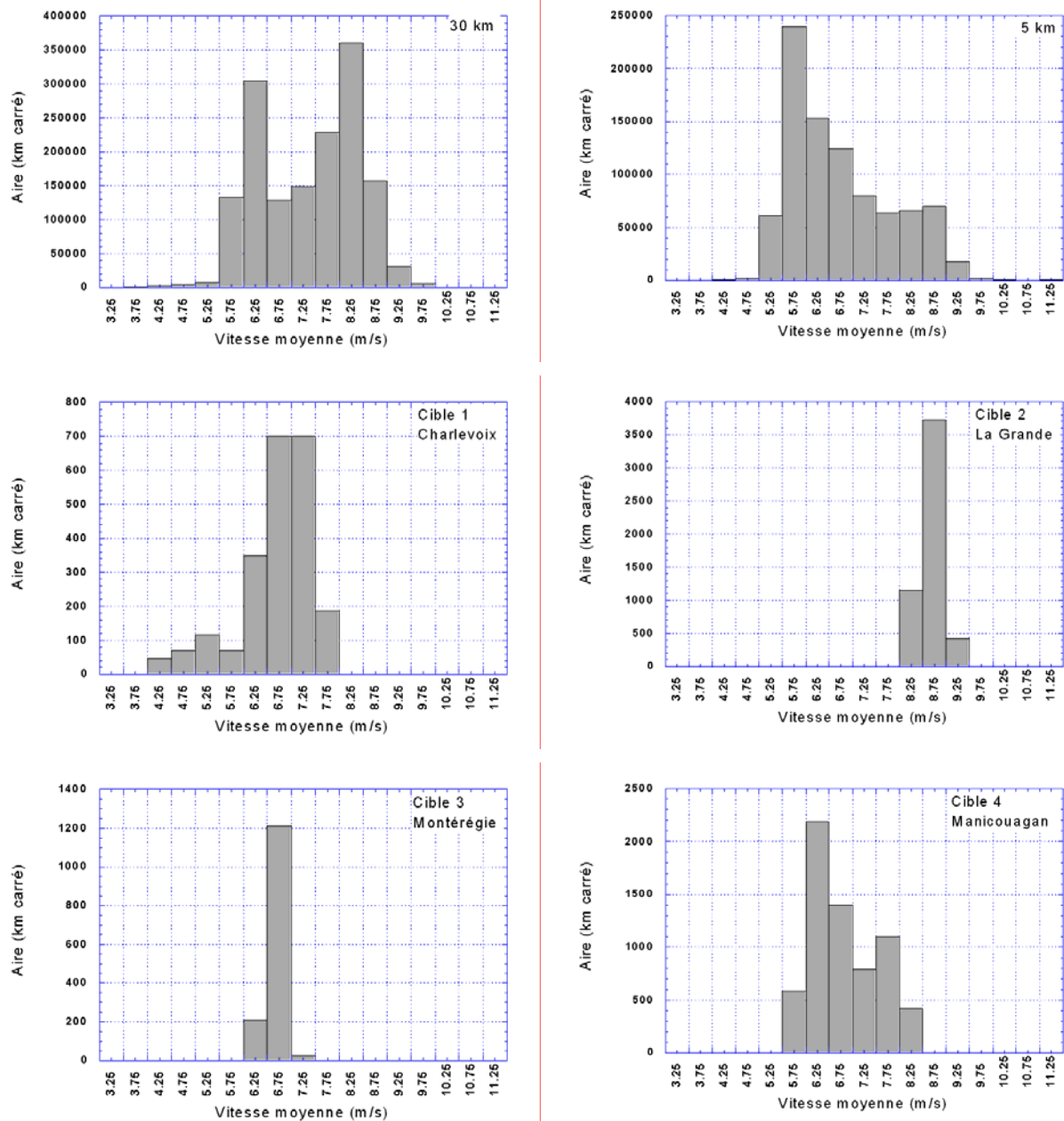


Fig. 7. Histogrammes des aires (km<sup>2</sup>) en fonction de la vitesse pour chacune des cibles. L'ordonnée donne la superficie, pour chaque cible, où la vitesse est dans l'intervalle de vitesse correspondant en abscisse (barre de l'histogramme). La rangée du haut donne les aires pour toute la région modélisée par WEST, à 30 km (gauche) et à 5km (droite).

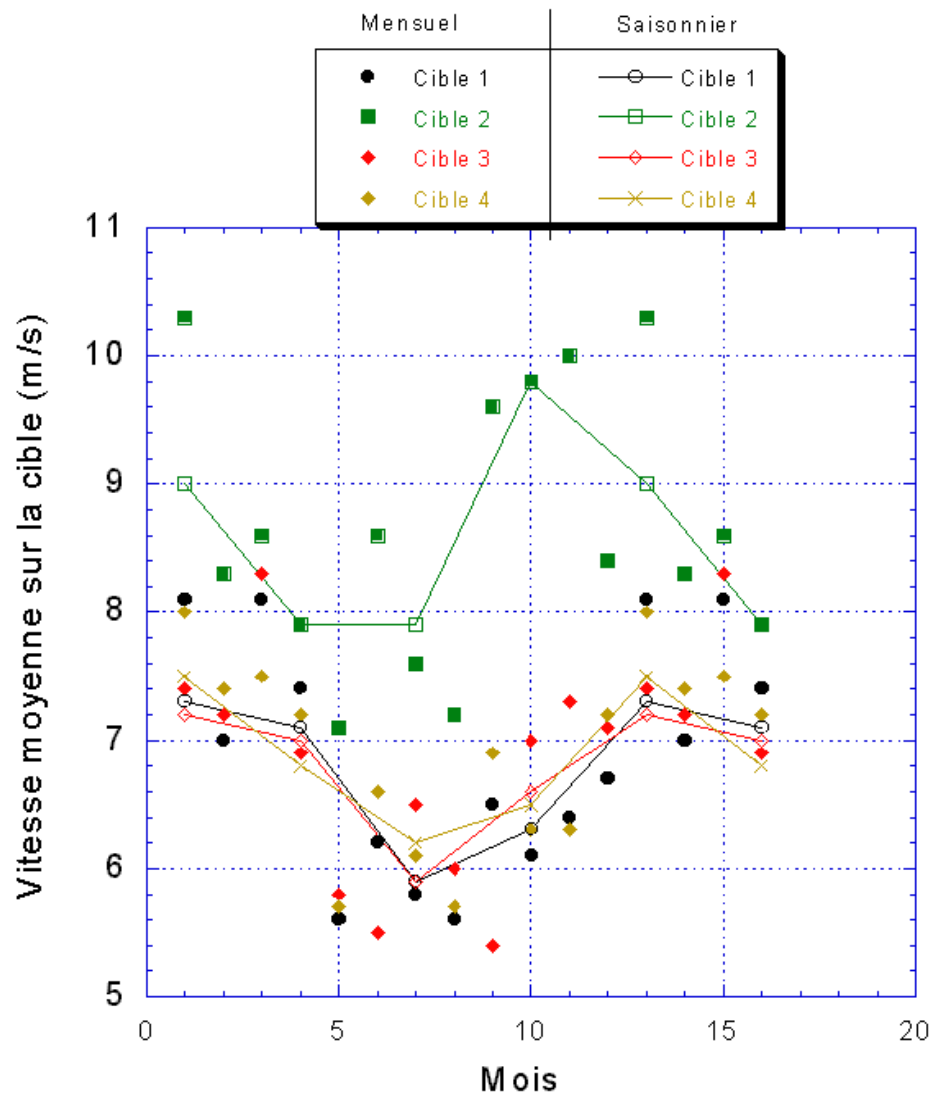


Fig. 8. Profil annuel de vitesse moyenne sur chacune des quatre cibles de la Fig. 6. Vitesse moyenne en fonction du mois (symboles pleins) et de la saison (symboles ouverts et lignes correspondantes). Janvier correspond à 1 sur l'abscisse; les données sont répétées aussi de 13 (=1) à 16 (=4) pour une meilleure visualisation du cyclage.

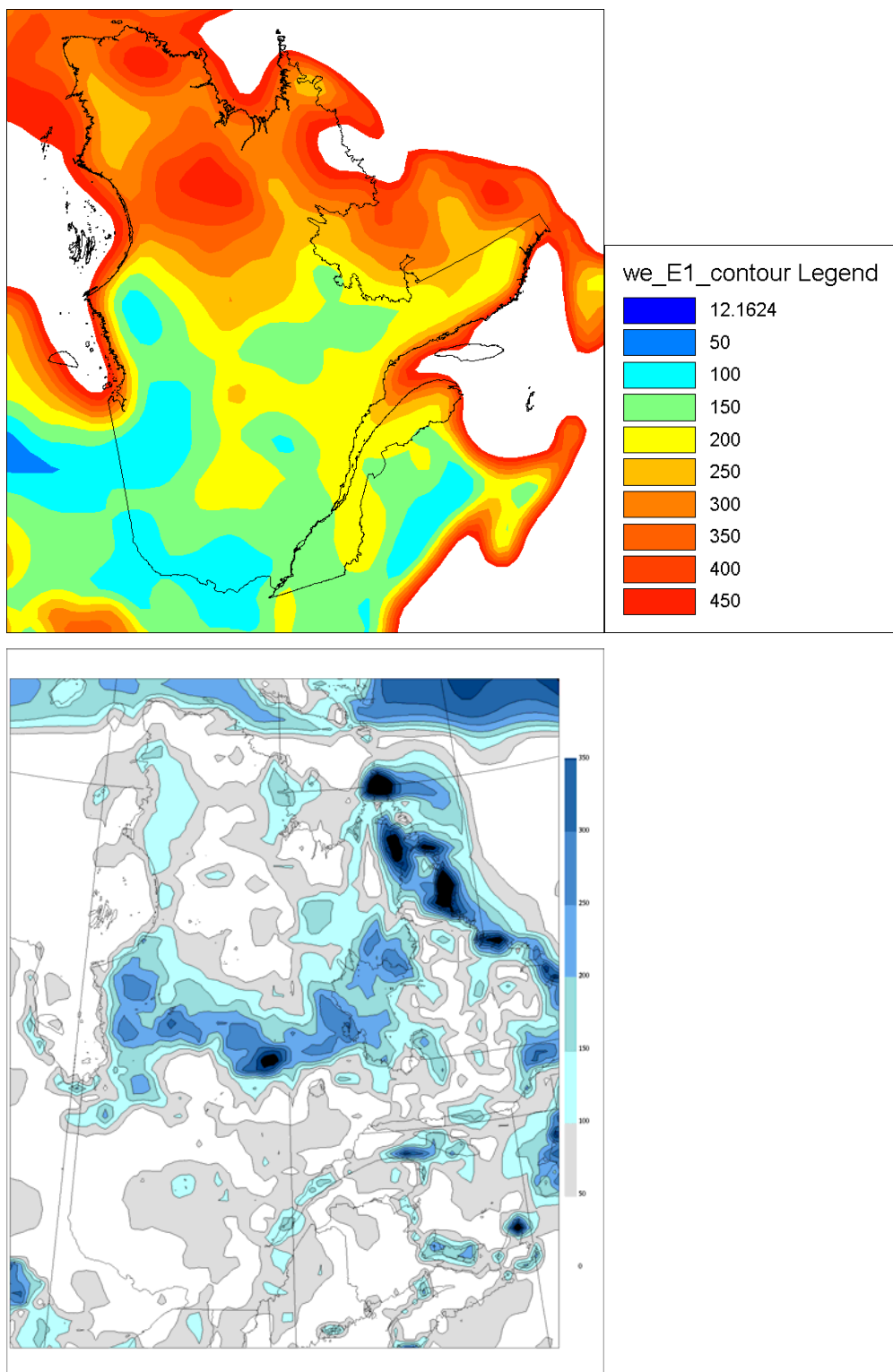


Fig. 9. Solution préliminaire présentée dans Le Devoir du 28 février 2004. La rangée du haut montre l'énergie éolienne moyenne (champ de l'image dans Le Devoir); la rangée du bas montre la différence absolue avec la solution WEST 30 km (Fig. 2) lorsque cette dernière est aussi exprimée en énergie éolienne moyenne et évaluée à 50 m d'altitude. La solution montrée dans Le Devoir était correcte en général à  $\pm 50$  à  $100 \text{ W/m}^2$ , sauf un déficit marqué dans la bande à 52 Nord, au sud de La Grande.

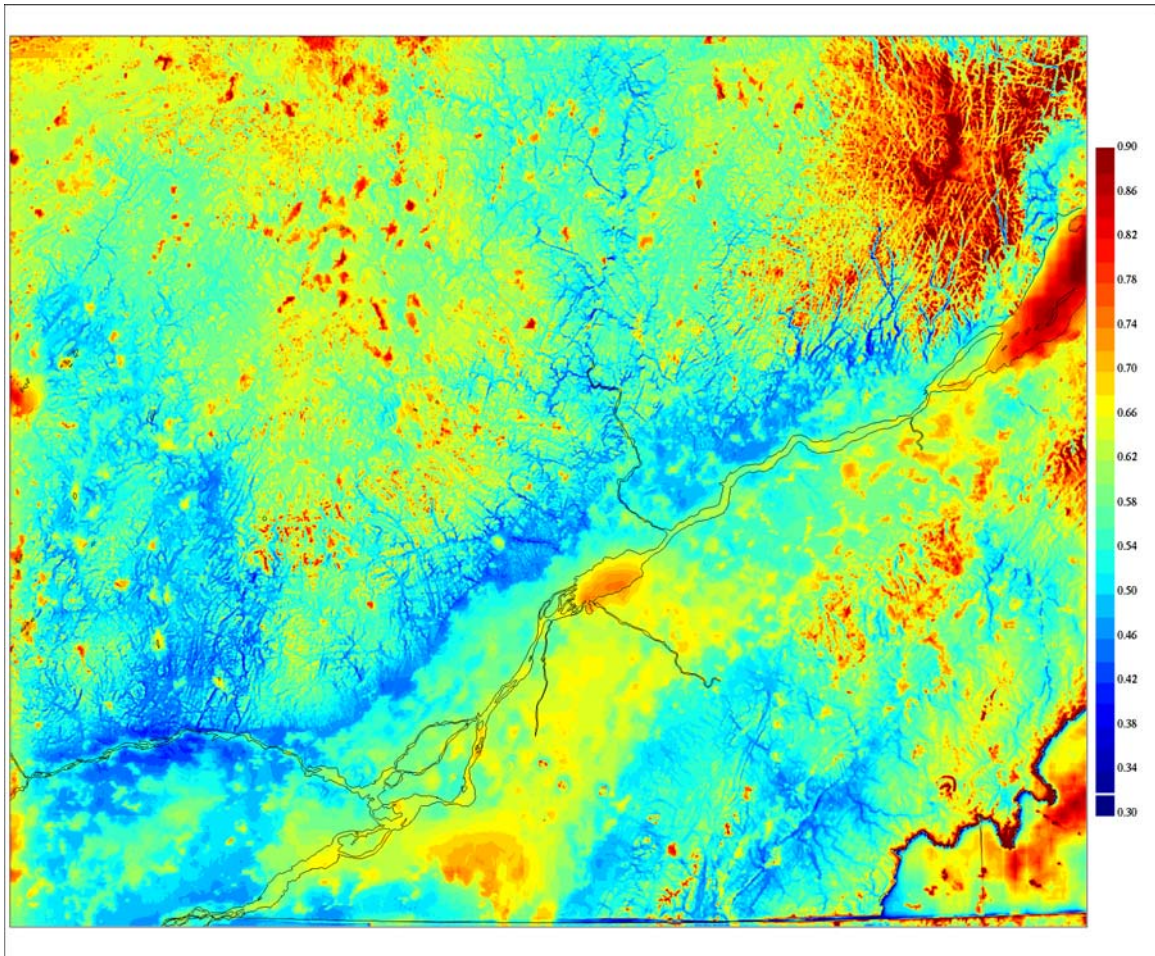


Fig. 10. Exemple de carte de vitesse moyenne à la micro-échelle produite par WEST à partir des résultats méso-échelle de 5 km. Ici, la maille est de 200 m et l'altitude de sortie est 50 m. Les données d'élévation utilisées sont tirées de la série RNCAN 1:250 000 (maille de 80 m) et celles de l'occupation des sols (*land-use*) sont tirées de la base de données GLCC (<http://edcdaac.usgs.gov/glcc/glcc.html>) (maille de 1 km).