

## 2. La ressource éolienne

### 2.5 Les atlas éoliens



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Dans tout projet impliquant l'utilisation d'énergie éolienne, une attention toute particulière doit être portée à l'estimation du potentiel éolien.
- Les atlas éoliens permettent de cartographier le vent de basse couche limite de façon ponctuelle sur une carte.
- L'analogie peut être faite avec les cartes de ressources minières, forestières...

# Introduction et objectifs

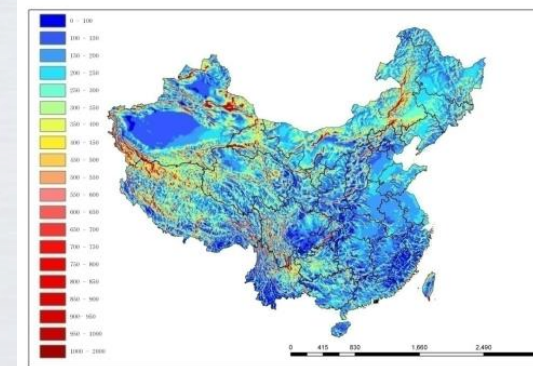
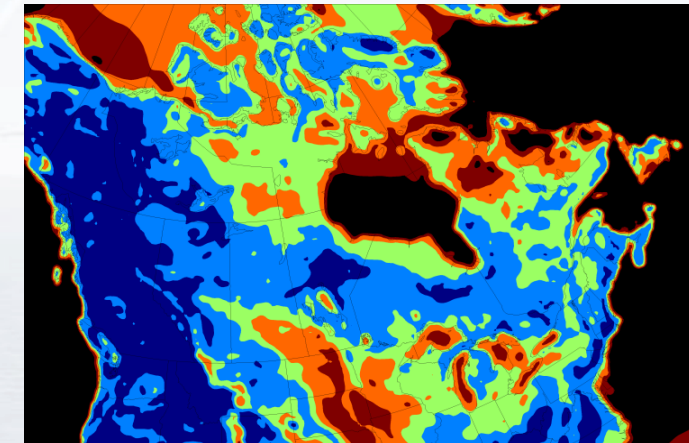
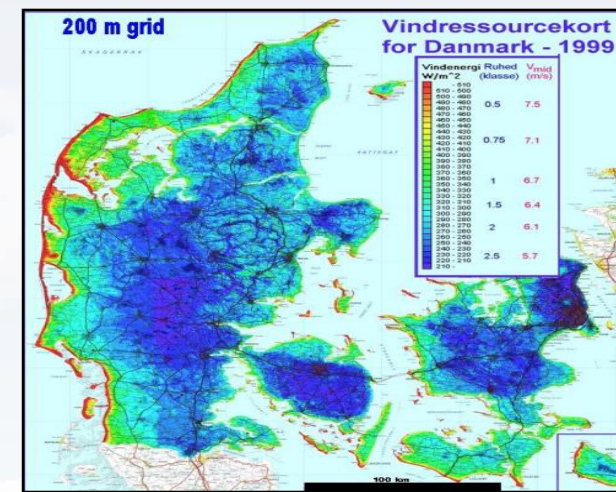
- Les objectifs de cette cartographie sont nombreux et variés :
  - Savoir quelle est la ressource éolienne régionale ou nationale
  - Guider (et non déterminer) la localisation des parcs
  - Supporter les décisions de l'administration publique
  - Développer l'industrie éolienne du pays
  - Prévoir le renforcement du réseau électrique dans les zones ayant un fort potentiel éolien
- Il est toutefois difficile de « projeter » les vents ponctuels sur une carte en raison de la difficulté d'interpolation du vent.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Historique***
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# Historique

- 1986: Atlas Battelle pour les États-Unis
- 1989: Atlas des vents européens
- 1992: Cartographie de Walmsley, Morris et al pour le Canada
- 1994: Carte de Salmon pour le sud-ouest de la Saskatchewan
- 1995: Carte WECTEC-MRNQ pour le Québec
- 1999: Carte micro échelle du Danemark
- ~2000: Carte Truewind de l'état de New-York  
(cf <http://www.awstruepower.com/iknowledge-center/maps>)
- 2001: Carte Truewind pour la Colombie Britannique
- 2001: Carte de vent du Canada basée sur 5 ans de prévisions opérationnelles à 25 km de résolution
- 2002: 1ère application commerciale de WEST: carte de la Nouvelle-Écosse (non-public)
- 2004: lancement de l'Atlas éolien du Canada
- 2006 : Atlas de la Chine presque complété au moyen de WEST
- 2008: entente pour Atlas éolien de Cuba par WEST
- 2012: Atlas numérique de la Chine complété:  
[http://www.icem2011.org/presentations2011/2\\_Tuesday/1D/1330\\_Rong.pdf](http://www.icem2011.org/presentations2011/2_Tuesday/1D/1330_Rong.pdf)



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- ***Méthodologie***
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# Méthodologie

1. Identification de l'ensemble des données météorologiques disponibles
2. Analyse et sélection des données pour établir la classification (critères de qualité de données)
3. Analyse des échelles de temps choisies pour la classification du potentiel éolien (annuel, saisonnier, mensuel)
4. Calcul de la densité de puissance éolienne pour chaque échelle de temps choisie
5. Ajustement vertical (loi de puissance)
6. Estimation du potentiel pour les régions montagneuses
7. Identification des facteurs locaux qui peuvent affecter le potentiel éolien

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- ***L'atlas éolien du Canada***
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# Question

- Quelle région du Canada possède le potentiel éolien le plus important ?
  - A. L'Ontario
  - B. Le nord du Québec
  - C. Le sud du Québec
  - D. L'Alberta
  - E. Le Manitoba

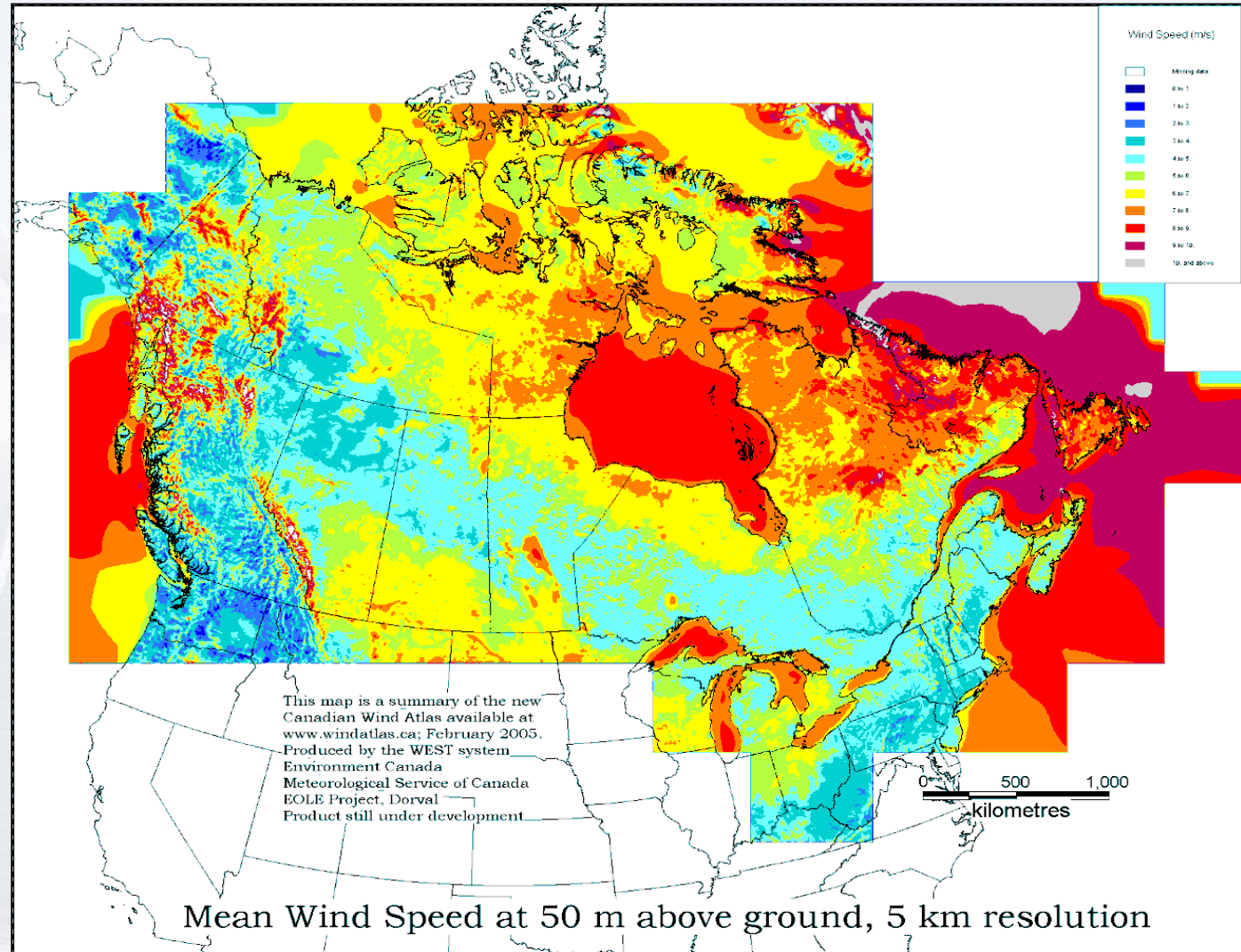
# L'atlas éolien du Canada

- 1er atlas éolien numérique au monde couvrant une grande surface
- Permet une interprétation sur l'ensemble du territoire
- Pas un livre mais un site web [www.windatlas.ca/index-fr.php](http://www.windatlas.ca/index-fr.php)
- Atlas = mosaïque de cartes méso mais non pas micro échelle
- Volet des moyennes
  - Annuelles
  - Saisonnières

# L'atlas éolien du Canada

## ❖ Carte principale :

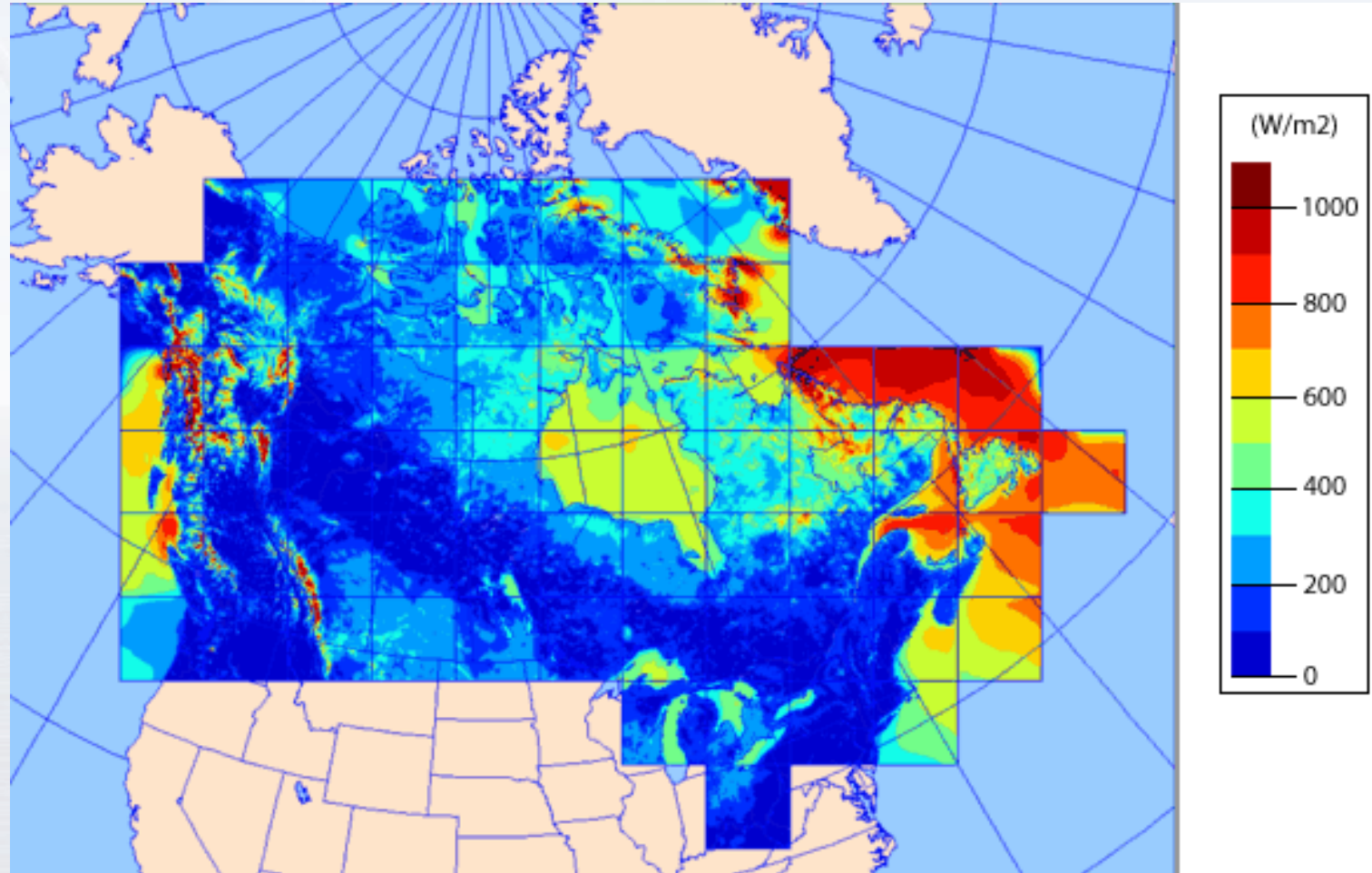
- Vitesse moyenne du vent 50 mètres au-dessus du sol
- Résolution spatiale de 5 km



# L'atlas éolien du Canada

## ❖ Carte principale :

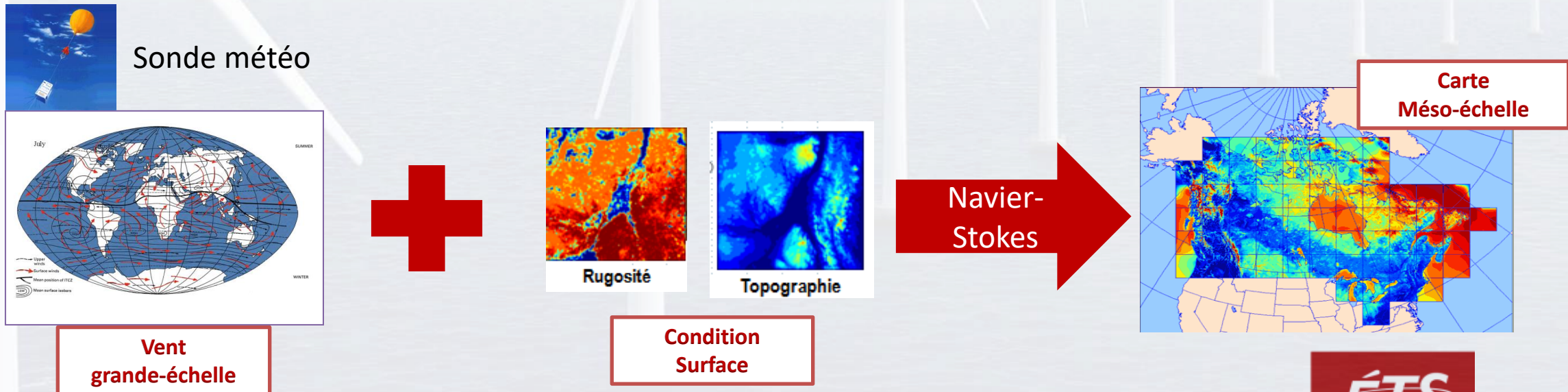
- Potentiel éolien (P/A) moyen à 50 mètres au-dessus du sol
- Résolution spatiale de 5 km



# L'atlas éolien du Canada

## ❖ Méthodologie :

- Solution des équations de la mécanique des fluides :
  - Mouvement de vent induit par le relief
  - Condition limite solide et rugueuse à la surface
  - Propagation verticale de la présence de la surface



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- ***L'atlas éolien du Québec***
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# L'atlas éolien du Québec

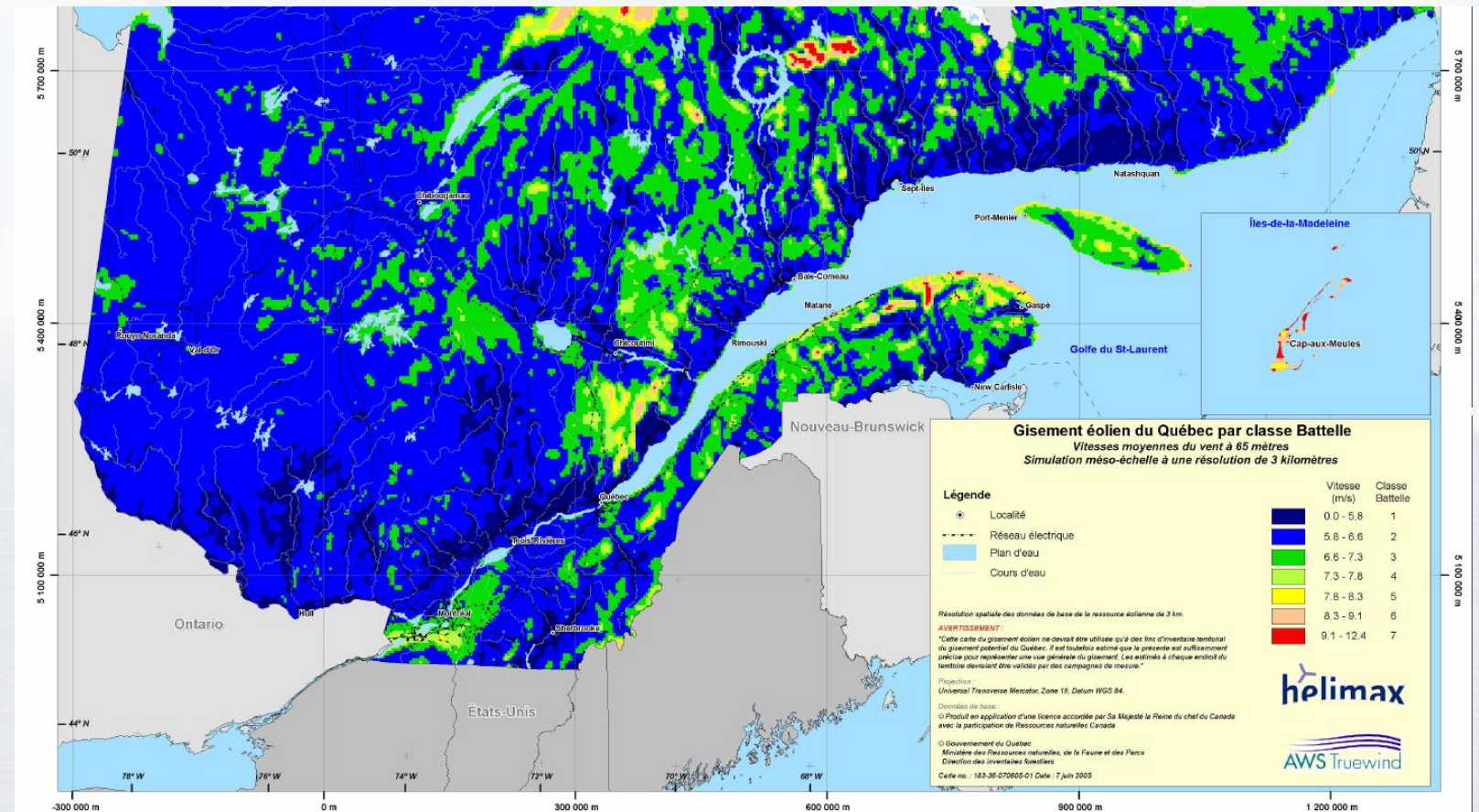
- Le territoire québécois possède des sites fort intéressants pour la production d'énergie éolienne. Les régions les plus favorisées sont la Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine, la Côte-Nord, le Bas-Saint-Laurent, le Saguenay–Lac-Saint-Jean et le Nord-du-Québec.
- Des cartes du gisement sont disponibles à 65, 80 et 100 m.
- Ces cartes sont réalisées pour la vitesse moyenne, la densité de puissance et la rugosité.
- Ces cartes sont réalisées pour la vitesse moyenne pour chaque région à 80m d'altitude seulement.



# L'atlas éolien du Québec

## ❖ Gisement éolien au Sud

- Vitesse moyenne du vent 65 mètres au-dessus du sol
- Résolution spatiale de 3 km



Source: Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles

[Le potentiel éolien au Québec](http://Le.potentiel.éolien.au.Québec) | [Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles \(gouv.qc.ca\)](http://Ministère.de.l'Énergie.et.des.Ressources.naturelles.gouv.qc.ca)

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- ***L'atlas éolien des États-Unis***
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- Conclusion

# L'atlas éolien des États-Unis

- Afin de cartographier les ressources éoliennes aux États-Unis, une classe des potentiels éoliens a été créée : Classes Battelle
- Les potentiels varient en fonction de la hauteur et s'échelonnent de 1 à 7.

Classe	à 10 m			à 30 m			à 50 m		
	Vitesse (m/s)	Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )	Énergie annuelle (kWh/m <sup>2</sup> /yr)	Vitesse (m/s)	Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )	Énergie annuelle (kWh/m <sup>2</sup> /yr)	Vitesse (m/s)	Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )	Énergie annuelle (kWh/m <sup>2</sup> /yr)
1	3.5 mauvais	50	440	4.1	80	700	4.4	100	880
2	4.4	100	880	5.1	160	1,400	5.5	200	1,750
3	5.0 moyen	150	1,310	5.9	240	2,100	6.3	300	2,830
4	5.5	200	1,750	6.5	320	2,810	7.0	400	3,500
5	6.0 bon	250	2,190	7.0	400	3,510	7.5	500	4,380
6	6.3	300	2,630	7.4	480	4,210	8.0	600	5,260
7	7.0 excellent	400	3,500	8.2	640	5,610	8.8	800	7,010
	9.5	1,000	8,760	11.1	1,600	14,020	11.9	2,000	17,520

Hypothèses :

Le vent suit une distribution de Rayleigh :

$$\overline{U^3} \sim 1.9 \overline{U}^3$$

U varie selon la hauteur z :

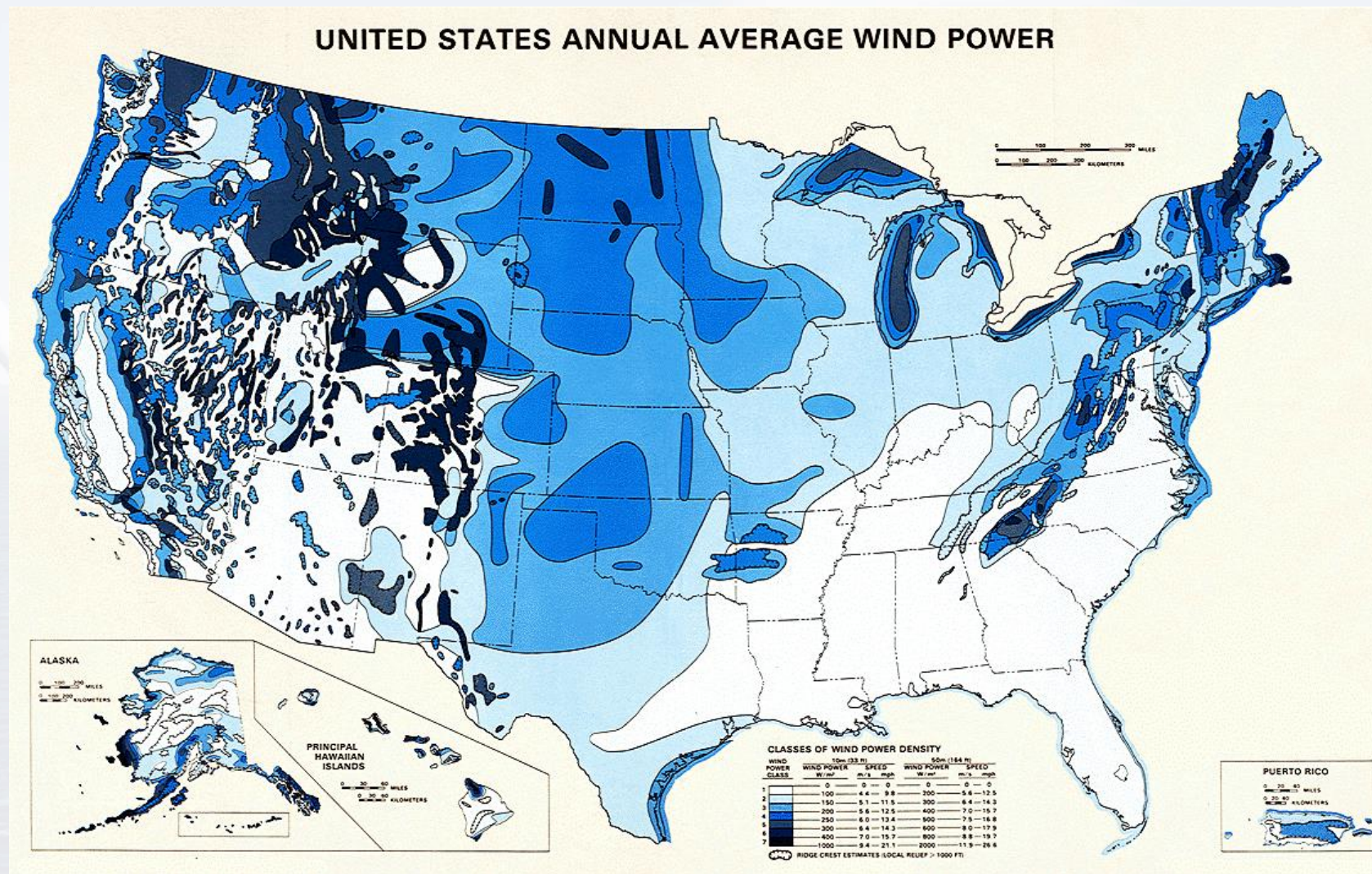
$$\frac{U(z_1)}{U(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^\alpha$$

Avec  $\alpha = \frac{1}{7}$

# L'atlas éolien des États-Unis

- *Wind Energy Resource Atlas of the United States, 1986* : Elliott et al, Pacific Northwest National Lab
- PNNL est une filiale de Battelle (<http://www.battelle.org>)
- La densité d'observations est importante mais moindre que pour l'Europe.
- Cet atlas est composé d'un grand nombre de cartes : saisonnières, annuelles...
- La méthodologie est moins élaborée que celle de l'Atlas européen, qui est plus récent (1989).

# L'atlas éolien des États-Unis



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- ***L'atlas éolien européen***
- Les atlas numériques
- Conclusion

# Question

- Quelles sont les caractéristiques de l'atlas européen ?
  - A. C'est ce qui se fait de mieux en termes d'atlas observationnel
  - B. Il a la particularité d'avoir une densité d'observations assez faible par rapport au Canada
  - C. Il est publié par un laboratoire danois
  - D. Les données sont traités avec le plus grand soin
  - E. Il utilise les classes de potentiel éolien de Battelle

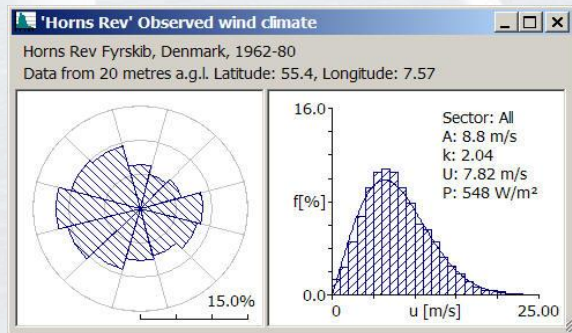
# L'atlas éolien européen

- L'atlas éolien européen est le summum en terme d'atlas purement observationnel.
- Avec plus de 220 stations, la densité d'observations est relativement grande par rapport à celle du Canada par exemple.
- Un très grand soin est apporté au traitement des données.
- Il est publié par le laboratoire RISO (Danemark) qui se trouve être le pionnier et leader mondial en méthodologie de calcul et mesure de la ressource éolienne.



# L'atlas éolien européen

- À partir du climat observé pour une altitude et une rugosité donnée, l'atlas de vent est déterminé localement pour différentes altitudes et rugosités.
- Ces atlas peuvent ensuite être interpolés spatialement afin de construire la carte européenne.



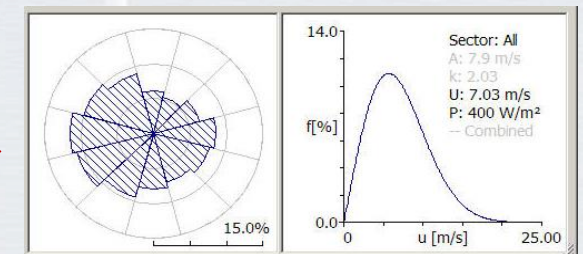
Données locales  
récoltées



'Horns Rev' Wind atlas

		R-class 0 (0.000 m)	R-class 1 (0.030 m)	R-class 2 (0.100 m)	R-class 3 (0.400 m)
Height 1 (z = 10 m)	m/s W/m <sup>2</sup>	7.32 456	5.14 187	4.48 124	3.53 60
Height 2 (z = 25 m)	m/s W/m <sup>2</sup>	8.00 580	6.12 293	5.50 214	4.63 128
Height 3 (z = 50 m)	m/s W/m <sup>2</sup>	8.59 700	7.03 400	6.41 310	5.55 205
Height 4 (z = 100 m)	m/s W/m <sup>2</sup>	9.27 902	8.25 607	7.57 466	6.65 315
Height 5 (z = 200 m)	m/s W/m <sup>2</sup>	10.18 1248	10.08 1146	9.19 864	8.04 569









Données estimées pour  
différentes configurations



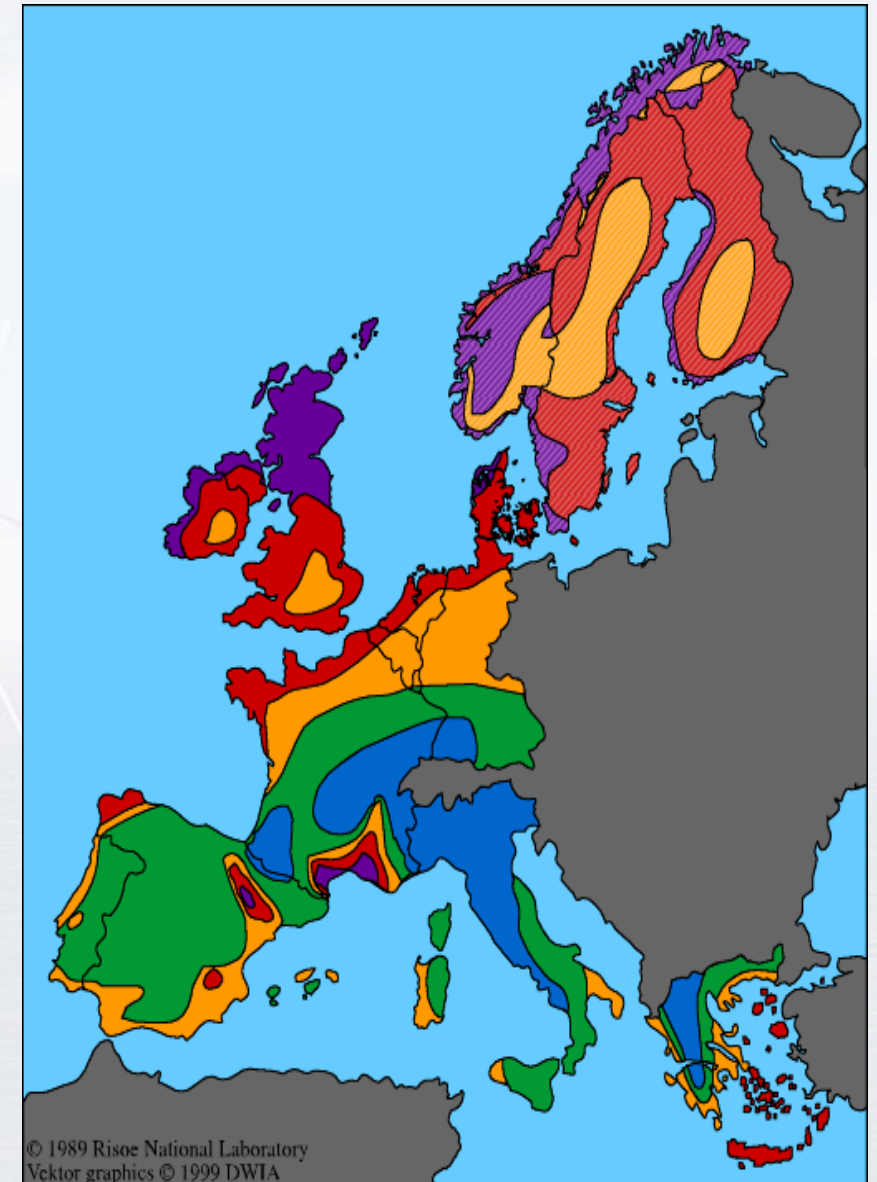
Interpolation spatiale

# L'atlas éolien européen

- Résultats de cette méthodologie :  
La carte européenne des vents (1989)

Couleur	Terrains avec obstacles	Terrains dégagés	Au bord de la mer	Mer ouverte	Collines et crêtes de collines
	m/s W/m <sup>2</sup>	m/s W/m <sup>2</sup>	m/s W/m <sup>2</sup>	m/s W/m <sup>2</sup>	m/s W/m <sup>2</sup>
	>6.0 >250	>7.5 >500	>8.5 >700	>9.0 >800	>11.5 >1800
	5.0-6.0 150-250	6.5-7.5 300-500	7.0-8.5 400-700	8.0-9.0 600-800	10.0-11.5 1200-1800
	4.5-5.0 100-150	5.5-6.5 200-300	6.0-7.0 250-400	7.0-8.0 400-600	8.5-10.0 700-1200
	3.5-4.5 50-100	4.5-5.5 100-200	5.0-6.0 150-250	5.5-7.0 200-400	7.0-8.5 400-700
	<3.5 <50	<4.5 <100	<5.0 <150	<5.5 <200	<7.0 <400
		>7.5			
		5.5-7.5			
		<5.5			

NB: chaque couleur a plusieurs significations, localement, en terme de vitesse, selon le type local de terrain.  
i.e.: Plusieurs choix possibles au même endroit sur la grande carte.



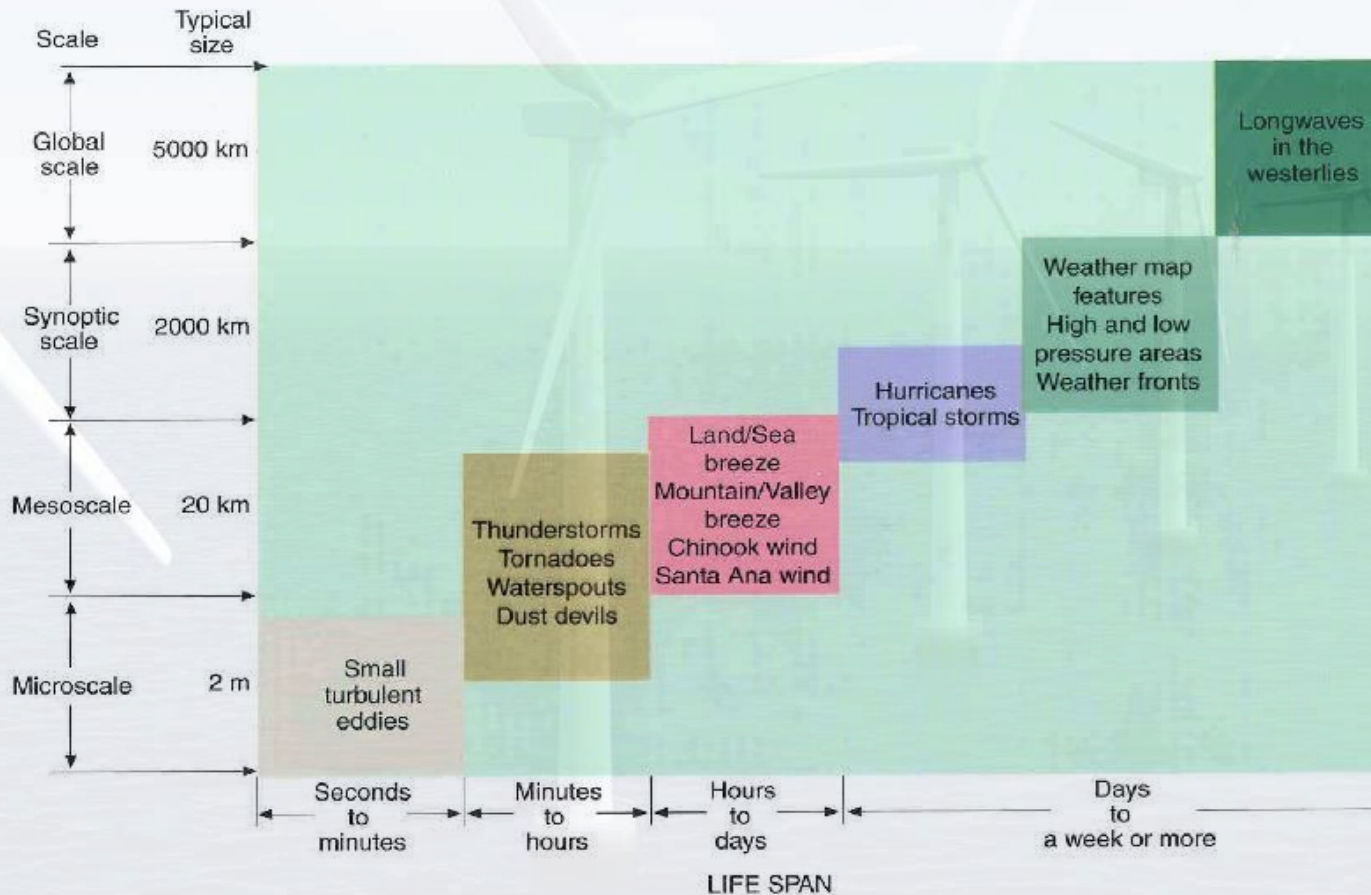
# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- ***Les atlas numériques***
- Conclusion

# Les atlas numériques

- Échelles des mouvements atmosphériques

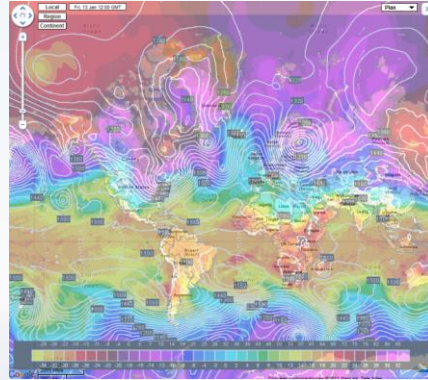
Scales of atmospheric motion with the phenomena's average size and life span



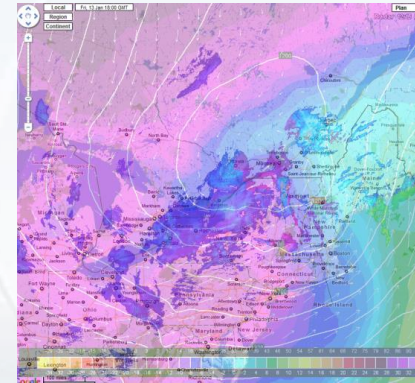
# Les atlas numériques

- Échelles d'observation atmosphériques (4 gammes)

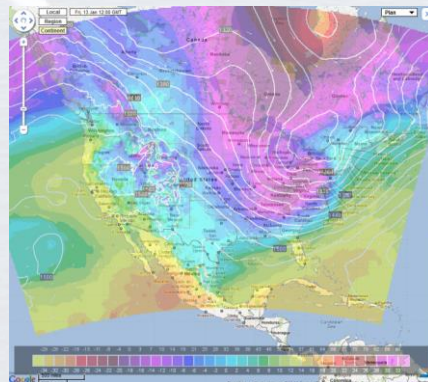
Échelle globale



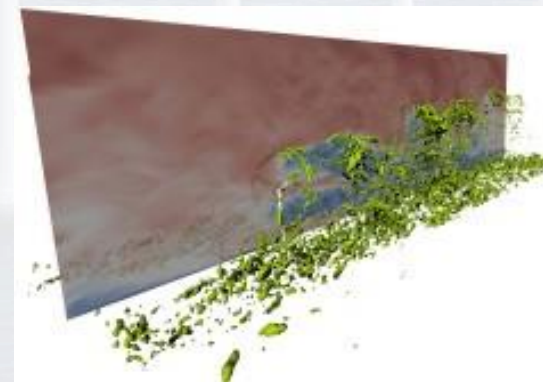
Méso-échelle



Échelle synoptique



Micro-échelle



# Les atlas numériques

- Depuis 1995, les modèles méso-échelle sont confirmés dans leur capacité de simuler des circulations à « haute résolution ».
- 1ère démonstration: atlas des vents de l'Irlande par les scientifiques de RISO : Frank, H. P., L. Landberg. Modelling the wind climate of Ireland. Boundary-Layer Meteorology, 85 : 359-378, 1997.
- Le chemin est tracé pour les atlas éoliens numériques !
- Ce modèle est utile pour combler les régions vides d'observations.
- Le modèle méso servira d'interpolateur dynamique pour générer des distributions spatiales mécaniquement plausibles entre les points de données.
- Exemples d'utilisation :
  - Irlande: une seule grille méso (LAM: Limited Area Model)
  - Canada: grande superficie (plusieurs LAMs en mosaïque)

# Les atlas numériques

- Il est désormais possible de retrouver toutes les données en ligne sur différents sites.
- Le site internet Wind Atlas (<http://www.windatlas.ca/>) regroupe toutes ces données :

❖ Carte des vents  
(vitesse moyenne)

The screenshot displays the Wind Atlas web application interface. At the top, it says "Click on the map to change the current tile:" with a small map showing a grid of tiles. The main map is a large heatmap showing wind speed distribution, with a color scale on the right ranging from 3 m/s (dark blue) to 10 m/s (dark red). The interface includes several control panels:


- Display Field:** Radio buttons for Mean Wind Speed (selected), Mean Wind Energy, Roughness Length, Topography, and Land/Water Mask.
- Height:** Radio buttons for 30m, 50m (selected), and 80m.
- Period:** Radio buttons for Annual (selected), Winter (DJF), Spring (MAM), Summer (JJA), and Fall (SON).
- Display Options:** Checkboxes for Power Lines, Lakes and Rivers, Roads, and Cities.
- Download and print:** A "Printing" button with the note "(opens a new window)".
- Cart:** Buttons for "Add", "Remove", and "Contents".
- Tools:** A "Help" button.
- Compare with real-life observations:** A "Compare" button.
- Values, wind roses, wind speed histograms, turbine formula at a point:** A section with input fields for "Lat.:" and "Long.:" or "Postal code:", and "Submit" and "Clear" buttons. It also includes the text "Latitude/longitude under the cursor: Lat.=N/A Long.=N/A" and "Click on the map, enter a latitude/longitude or enter a postal code to display information."

# Les atlas numériques

## ❖ Carte des vents (énergie moyenne)

**Navigation**

Click on the map to change the current tile:



**Display Field**

- Mean Wind Speed
- Mean Wind Energy
- Roughness Length
- Topography
- Land/Water Mask

**Height**

- 30m
- 50m
- 80m

**Period**

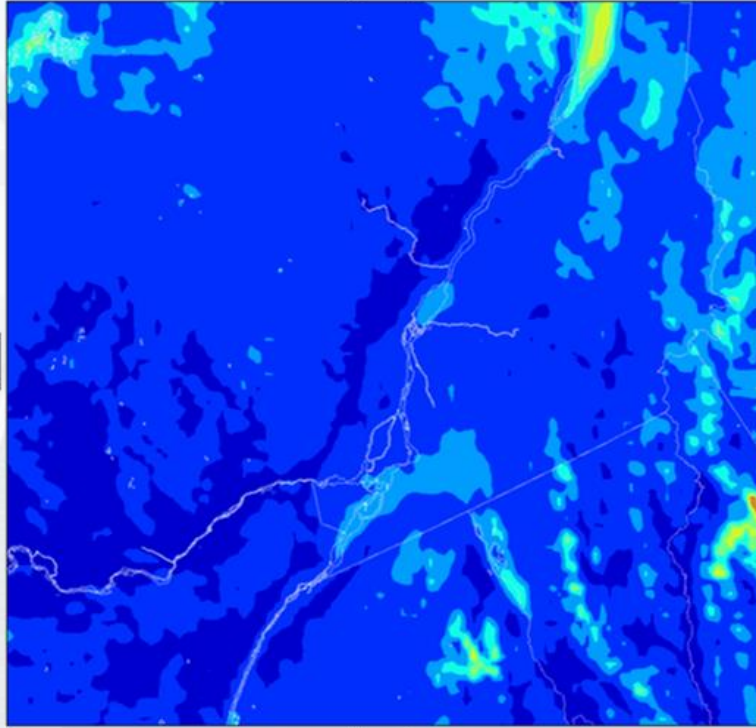
- Annual
- Winter (DJF)
- Spring (MAM)
- Summer (JJA)
- Fall (SON)

**Display Options**

- Power Lines
- Lakes and Rivers
- Roads
- Cities

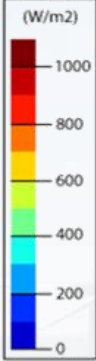
**Quadrangle 31 (j=7; i=20) - Mean Wind Energy - 50m - Winter (DJF)**

Zoom Overall map



**Legend**

(W/m<sup>2</sup>)



**Cart**

Add

Remove

Contents

**Tools**

Help

**Compare with real-life observations**

Compare

**Values, wind roses, wind speed histograms, turbine formula at a point**

Latitude/longitude under the cursor: Lat.=46.555 Long.= -76.449

Click on the map, enter a latitude/longitude or enter a postal code to display information.

Lat.:  Long.:  or Postal code:

Submit Clear

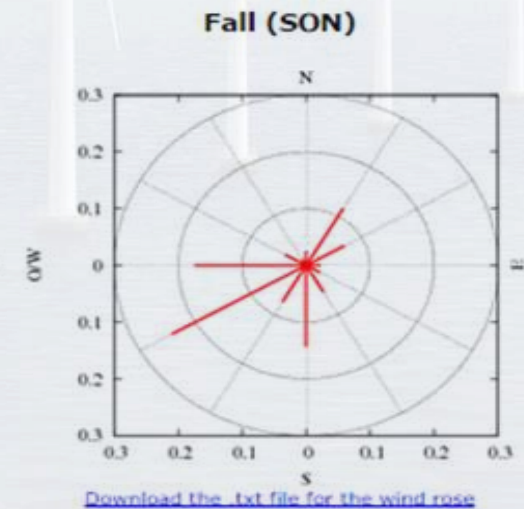
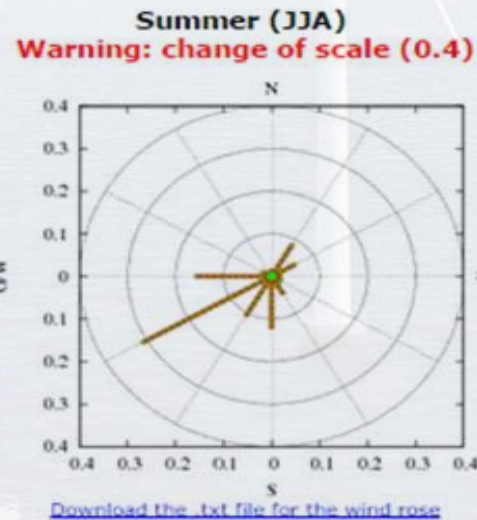
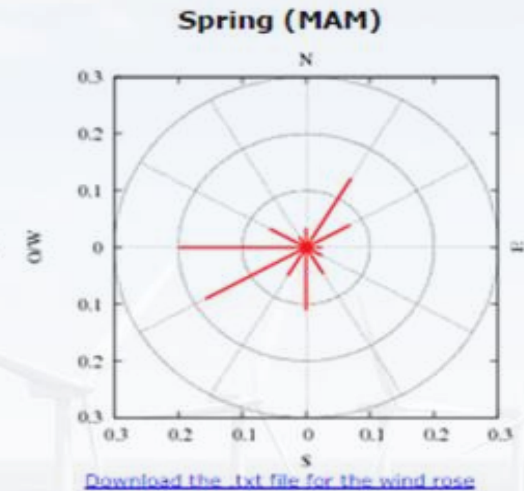
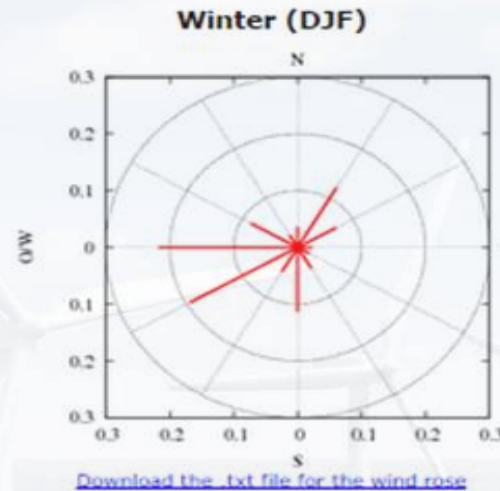
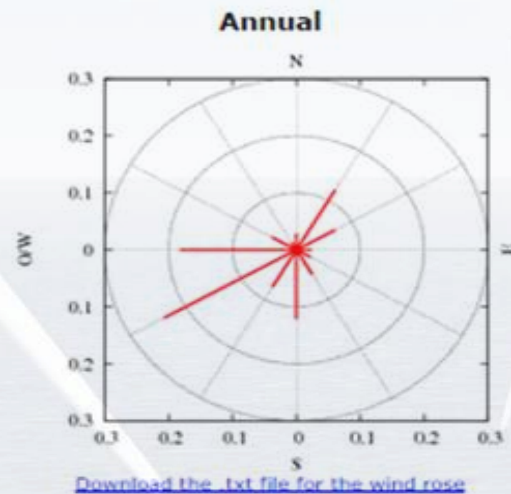
# Les atlas numériques

- Code postal → H4E 3C6

Values	Roses	Histograms	Turbine formula	
<b>Numerical Values at 50m</b>				
Latitude = 45.442, longitude = -73.576				
Period	Mean Wind Speed	Mean Wind Energy	Weibull shape parameter (k)	Weibull scale parameter (A)
Annual	4.88 m/s	113.88 W/m <sup>2</sup>	1.95	5.50 m/s
Winter (DJF)	5.54 m/s	157.75 W/m <sup>2</sup>	2.05	6.25 m/s
Spring (MAM)	4.89 m/s	111.38 W/m <sup>2</sup>	2.00	5.51 m/s
Summer (JJA)	4.11 m/s	64.94 W/m <sup>2</sup>	2.04	4.64 m/s
Fall (SON)	5.03 m/s	120.50 W/m <sup>2</sup>	2.02	5.68 m/s

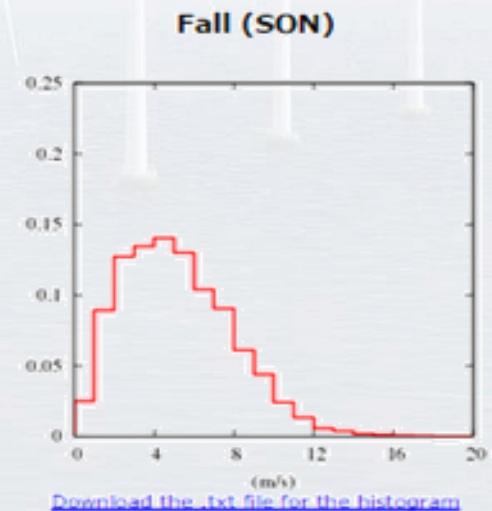
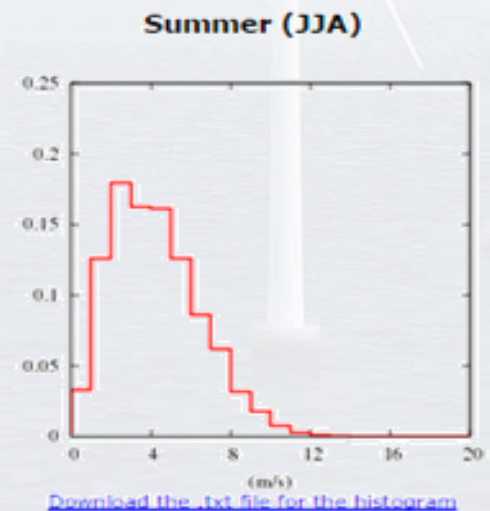
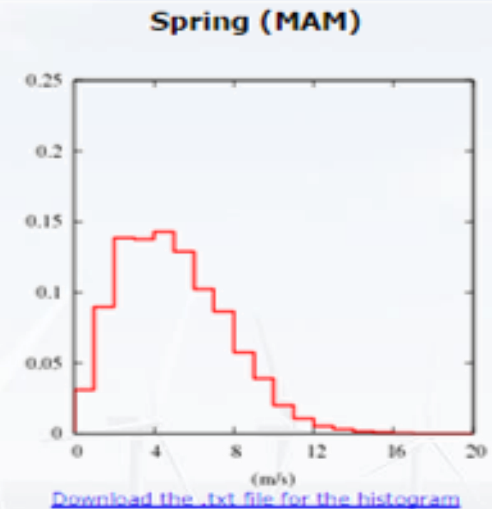
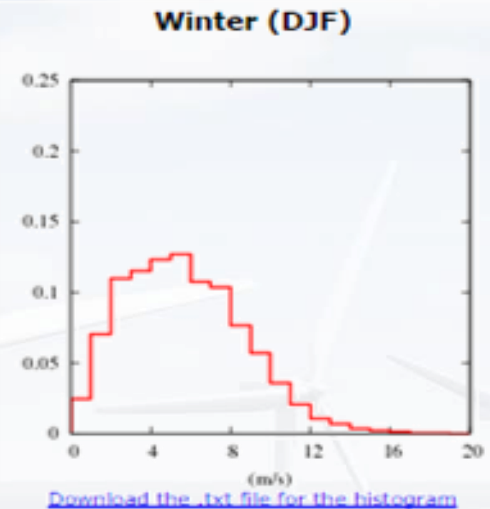
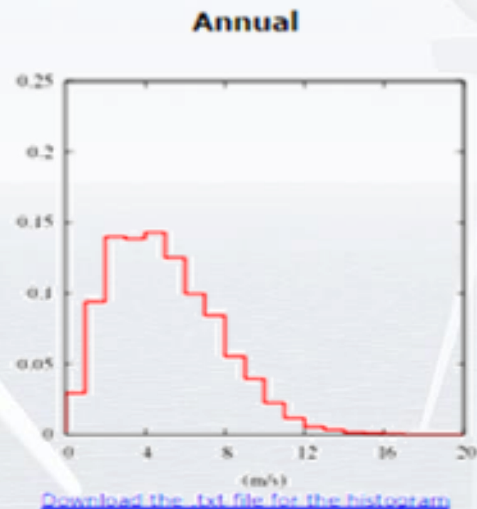
# Les atlas numériques

- Code postal → H4E 3C6
  - Rose des vents



# Les atlas numériques

- Code postal → H4E 3C6
  - Histogrammes



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Historique
- Méthodologie
- L'atlas éolien du Canada
- L'atlas éolien du Québec
- L'atlas éolien des États-Unis
- L'atlas éolien européen
- Les atlas numériques
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Il peut être extrêmement difficile et onéreux d'obtenir une estimation précise des ressources disponibles à un endroit donné.
- Le recours aux atlas est donc très souvent indispensable pour la réalisation de projets éoliens.
- Il faut toutefois avoir en tête que les atlas sont des estimations de la ressource éolienne issues d'étude très complexe en raison de l'aspect aléatoire et de la rapidité de variations du vent.

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION !**



# MERCI



## Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D  
Tél: 418-962-9848 # 340  
[cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca](mailto:cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca)  
[Hussein\\_ibrahim01@uqar.ca](mailto:Hussein_ibrahim01@uqar.ca)  
[Hussein.ibrahim@itmi.ca](mailto:Hussein.ibrahim@itmi.ca)