

Faculté de Foresterie, de Géographie et de Géomatique

Département des Sciences Géomatiques

GMT- 6003 - Modèles numériques de terrain et applications



Projet de session

Évaluation du potentiel éolien de la municipalité de Montmagny

Rédigé par :

Anned-Linz **SENADIN**, Msc.

Chargée de cours : Hédia **Sammari**, Ph. D

Décembre 2012

Table des matières

Liste des sigles, symboles et abréviations.....	3
Liste des annexes	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux.....	4
Contexte, problématique et objectifs.....	1
I- Identification des besoins ou critères pour l'implantation du parc éolien.....	3
II- Données nécessaires et utilisées pour répondre aux besoins exprimés	4
III- Méthodologie générale, traitements, résultats et analyses	6
Conclusion.....	17

Liste des sigles, symboles et abréviations

BDTQ : Base de Données Topographiques de Québec

BPP : désigne le bâtiment le plus proche par rapport à zone d'implantation des éoliennes

Canwea : Canadian wind energy association (Association canadienne d'énergie éoliennes)

CTE : Cadastre type éolien

dB : Décibel, unité de mesure du bruit (son)

dd : Degré décimale

ESA : Espaces sans arbre

GES : Gaz à Effet de Serre

m : Mètre

MNA : Modèle numérique d'altitude

MNT : Modèle numérique de Terrain

MRC : Municipalité Régionale de Comté

MRNF : Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune

m/s : Mètre par seconde

Liste des annexes

Annexe A : Localisation de la zone d'intérêt par rapport à Québec2

Annexe B : Modèle numérique de surface (MNS = MNA + peuplement)3

Annexe C : Zones d'absence d'arbre et d'implantation du parc éolien4

Liste des figures

Figure 1: Carte de la vitesse des vents à Montmagny.....	6
Figure 2 : Modèle numérique d'altitude de la municipalité de Montmagny	7
Figure 3 : MNA reclassé, parcelles non propices et bâtiments.....	8
Figure 4: Superposition des espaces sans arbres sur le croisement MNA et Vent	9
Figure 5 : Superposition du réseau hydro sur l'intersection MNA x Vent, ESA et CTE.....	10
Figure 6 : Position des bâtiments y compris le BPP par rapport à la zone simulée.....	11
Figure 7 : Localisation des éoliennes dans le parc.....	12
Figure 8 : Visibilité de la municipalité (les bâtiments) par rapport au parc éolien.....	13

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des besoins ou critères nécessaires à l'implantation du parc éolien	3
Tableau 2 : Données utilisées, sources, système de coordonnées et format.....	4
Tableau 3 : Informations de base sur les éoliennes disponibles sur le marché.....	5
Tableau 4 : Coût moyen d'achat et d'installation de petites éoliennes	5
Tableau 5 : Positions et caractéristiques des éoliennes implantées	14
Tableau 6 : Synthèse des traitements et analyses réalisés	16

Contexte, problématique et objectifs

Depuis les années 60, l'augmentation des températures moyennes des océans et de l'atmosphère, et l'élévation du niveau de la mer, ne cessent de s'amplifier. Ce phénomène, qualifié de « changement climatique » qui ne cesse d'inquiéter les gouvernements, a remis au cœur des préoccupations internationales la question de l'environnement. Le changement climatique étant la combinaison de plusieurs facteurs, le défi est d'être capable de comprendre le degré de responsabilité de chaque cause. La pollution est souvent citée en premier, notamment à cause de l'émission de plus en plus importante de gaz à effets de serre (GES) dont le plus connu est le CO₂.

Dans ce contexte, plusieurs pays ont pensé aux effets indésirables des types d'énergie qu'ils produisent. Nombreux sont ceux qui ont envisagé l'usage de biocarburants en vue de réduire la production de GES libéré dans l'atmosphère. D'autres qui utilisaient déjà à grande échelle l'énergie éolienne¹, comme l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne et les USA, augmentent davantage leur taux d'utilisation.

Par contre, contrairement à ces pays qui font depuis longtemps grand usage de ce type d'énergie, le développement de l'industrie éolienne au Québec n'a débuté de façon concrète qu'en 1998 avec le projet « Le Nordais », un parc éolien implanté en Gaspésie et dans la municipalité régionale de Comté (MRC) de Matane.

La croissance rapide de la filière éolienne partout dans le monde a donné naissance à un secteur d'activité dynamique. Bien engagé dans cette dynamique internationale menant vers le sommet de Copenhague de décembre 2009, le Québec s'est donné l'objectif de réduire, d'ici 2020, ses émissions de GES de 20 % sous les niveaux de 1990. Or, la production d'énergie éolienne bien qu'en augmentation, ne dépasse pas 2%. L'atteinte de cet objectif très ambitieux ne paraît pas évident, à mon humble avis.

Environ 52 % des émissions de GES québécoises proviennent de la combustion de produits pétroliers². Le Québec demeure donc sur une mauvaise pente. Le pire, c'est que le Canada et particulièrement la province de Québec, est l'une des régions du globe les mieux équipées pour tirer avantage de l'éolien (Canwea, 2012)³.

¹ Il s'agit d'une forme d'énergie renouvelable dont le niveau d'émission de gaz à effet de serre est très limité.

² <http://www.equiterre.org/choix-de-societe/dossier/le-quebec-et-les-changements-climatiques-une-vision-2020>

³ <http://www.ledevoir.com/environnement/actualites-sur-l-environnement/283966/energie-eolienne-le-quebec-jouit-d-un-potentiel-rare>

À l'heure actuelle, certaines municipalités sont privées de zonage spécifique aux petites éoliennes au Canada. Autrement dit, il y a un manque de politique officielle pour les petites éoliennes (Canwea, 2006)⁴. Cette situation a occasionné la mise en place de façon incontrôlée de petites éoliennes à usage privé dans des endroits non propices, par certains passagers clandestins. Ces petites éoliennes sont parfois installées dans des zones protégées. Ce qui provoque pas mal de problème, entre autres, la nuisance aux oiseaux (y compris les chauves souris) et aux voisins, à cause du bruit. De plus, certaines d'entre elles ne sont pas géo-localisées et ne sont donc pas inscrites sur les cartes aéronautiques, ce qui est susceptible de provoquer des accidents aériens.⁵

Par ailleurs, cette situation n'est pas différente à Montmagny. Ainsi, il devient incontournable, de mettre en place une politique qui doit statuer sur les principes à respecter dans mise en place de ces petites éoliennes. Cette politique, pour être efficace, doit se faire sur la base d'un ensemble d'idées émanées de cadres de différents domaines, entre autres, agronomes, sociologues, économistes, aménagistes et géomaticiens.

Ce travail de fin de session doit donc apporter une contribution substantielle à cette situation problématique, surtout du côté de la géomatique (outils de modélisation numérique du terrain).

Son objectif global est d'étudier le potentiel éolien de la municipalité de Montmagny, située dans la région de Chaudière-Appalaches au bord du fleuve Saint-Laurent⁶.

De manière spécifique, nous cherchons à identifier les meilleurs endroits d'implantation d'un ou de plusieurs parcs totalisant au maximum 10 petites éoliennes dans la zone pour la production du maximum d'énergie possible, sous le respect d'un certain nombre de contraintes à identifier.

L'utilisation de modèles numériques de terrain, renforcés et/ou combinés à d'autres types de données et d'analyses sera au cœur de ce projet. La suite du rapport s'articule autour de cinq (5) grandes sections :

La première section porte sur l'identification des différents critères à prendre en compte, les besoins nécessaires ou problèmes à résoudre.

La deuxième section consiste à inventorier toutes les données nécessaires à la prise en compte des critères, besoins ou problèmes.

La troisième section présente notre approche méthodologique, les traitements, résultats et analyses réalisés.

Enfin, la dernière section conclue sur les principaux enseignements de notre travail.

⁴ Canwea, 2006. Étude sur le choix du site et le zonage des petites éoliennes. <http://www.windatlas.ca>

⁵ Ce cas n'est pas encore enregistré au Canada, mais faut-il bien prévoir car prévenir vaut mieux que guérir.

⁶ Elle s'étend sur une superficie d'environ 127 km². Une vue générale est présentée en annexe A.

I- Identification des besoins ou critères pour l'implantation du parc éolien

Le choix effectif de la zone d'implantation d'un parc éolien doit prendre en compte divers facteurs, y compris les ressources éoliennes disponibles dans la zone d'intérêt, les considérations en matière de sécurité et les aspects esthétiques. Un mauvais choix peut entraîner des conflits entre voisins, dirigeants municipaux et propriétaires. Les différents critères ou besoins à prendre en compte en vue de planter le parc au meilleur endroit possible sont indiqués dans le tableau 2 ci-après. Les données sont inscrites sous forme codée (lettre B avec indice) dans la première colonne, dans le but de faciliter leurs appel et croisement avec celles d'autres tableaux pour des analyses futures.

Tableau 1 : Présentation des besoins ou critères nécessaires à l'implantation du parc éolien

No	Besoin/critère	Description
B ₁	Prise en compte de la vitesse (v) des vents	$4 \text{ m/s} < v \leq v_{max}$ ⁷
B ₂	Prise en compte de la topographie	L'idéal serait le point le plus élevé de la zone
B ₃	Prise en compte de la superficie (s) des parcelles	$s \geq 0.1 \text{ ha}$, pour les éoliennes $\leq 25 \text{ m}$ et $s \geq 0.2 \text{ ha}$ pour les éoliennes plus élevées
B ₄	Prise en compte du type d'occupation de sol	Les éoliennes doivent être implantées sur des surfaces sans arbre
B ₅	Prise en compte du réseau hydrographique	Les éoliennes ne doivent pas être implantées dans des lacs et cours d'eau
B ₆	Accessibilité du parc	Le parc devra être le plus proche possible des voies de communication ⁸ .
B ₇	Marges de recul (m) autour des obstacles (arbres, bâtiments), routes et limites des parcelles voisines	$m \geq \text{hauteur de l'éolienne}$
B ₈	Distance (d) entre les tours d'un même parc	$h \leq d \leq 300 \text{ m}$ ⁹
B ₉	Obstacles en hauteur qui perturbent le vent	L'éolienne doit être installée bien au-dessus des obstacles environnants
B ₁₀	Prise en compte du bruit généré par le parc (BA)	$BA < 85 \text{ dB}$, mesuré par rapport au bâtiment habité le plus proche (BPP) ¹⁰

⁷ La plupart des petites éoliennes entre en fonction uniquement lorsque la vitesse du vent franchit le seuil de 4m/s. L'idéale serait l'endroit où la vitesse des vents est maximale.

⁸ La distance idéale d'une éolienne par rapport aux voies de communication serait exactement la hauteur de l'éolienne car on cherche à être le plus près possible tout en respectant une marge de recul qui ne doit pas être inférieure à h.

⁹ h est la hauteur de la plus grande tour voisine immédiate des autres dans le parc. À toute autre distance d supérieure à 300 m, l'éolienne en question n'est pas considérée comme faisant partie du parc.

II- Données nécessaires et utilisées pour répondre aux besoins exprimés

Pour la réalisation du projet, des données de différentes sources et thématiques ont été collectées gratuitement et utilisées. Le tableau 1 ci-après présente ces données, leur fournisseur/éditeur, les systèmes de coordonnées dans lesquels elles ont été téléchargées, leur format et leur lien d'accès.

Tableau 2 : Données utilisées, sources, système de coordonnées et format

No	Nom	Fournisseur/ Auteur	Système de coordonnées	Format	Hyperlien
D ₁	Vitesse des vents	Atlas canadien d'énergie éolienne	Polaire stéréographique	MID/MIF	CWEA
D ₂	MNA ¹¹	MRNF	GCS_North_American_1983	ArcInfo	Géo-Index
D ₃	Cadastre	Foncier Québec/ MRNF	GCS_North_American_1983	ArcInfo	Géo-Index
D ₄	Peuplements écoforestiers	Centre GéoStat/MRNF et DIF ¹²	MTM -NAD-83	Shapefile	Géindex +
D ₅	Réseau hydrographique	Centre GéoStat/ BDTQ du MNRF	GCS_North_American_1983	Shapefile	Géo-Index+
D ₆	Voies de communication	Centre GéoStat/ BDTQ du MNRF	GCS_North_American_1983	Shapefile	Géo-Index+
D ₇	Bâtiments	Centre GéoStat/ BDTQ du MNRF	GCS_North_American_1983	Shapefile	Géo-Index+
D ₈	Limites municipales	MRNF ¹³	GCS_North_American_1983	Shapefile	MRN

En plus des données du tableau 2, nous avons été aussi recherché des informations sur les types d'éoliennes (hauteur, puissance, bruit et coût) existant sur le marché. Nous avons également beaucoup creusé sur les principes de propagation du bruit avec la distance et la variation du nombre d'éoliennes. Nous présentons dans le tableau 3 ci-après les types d'éolienne disponibles sur le marché de Québec. Le

¹⁰ Le seuil de danger du niveau sonore au delà duquel des dommages peuvent survenir est estimé à 85dB. Le niveau sonore décroît en fonction du carré de la distance. Il est donc important de déterminer à quelle distance des bâtiments l'éolienne doit être installée. Cette formule est bien développée dans la section suivante.

¹¹ Modèle numérique d'altitude

¹² Direction des Inventaires Forestiers

¹³ Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

développement mathématique de la propagation du bruit, à partir des informations de base recueillies, se fait dans la section 3.

Tableau 3 : Informations de base sur les éoliennes disponibles sur le marché

No Éolienne	Hauteur	Puissance moyenne (kW)	Bruit(dB) à 50 m
1	10	0,5	45
2	15	2	55
3	20	10	65
4	30	15	70
5	50	75	85

Source : Canwea, 2006

Le tableau 3 montre que les trois variables hauteur, puissance et niveau de bruit sont corrélées. En effet, lorsque la hauteur augmente, la puissance et le bruit augmentent aussi.

Tableau 4 : Coût moyen d'achat et d'installation de petites éoliennes

Type d'usage	Puissance en kW	Éoliennes seulement (\$/kW)	Système complet (installation comprise) (\$/kW)	Coût annuel d'entretien(\$/kW)
Chargement batterie	]0 1]	[2800 3000]	[5000 7000]	[150 210]
Résidence	]1 10]	[3000 4000]	[6000 8000]	[180 240]
Ferme	]10 300]	[2000 2500]	[3000 4000]	[90 120]

Source : Canwea, 2006

Les coûts estimés dans le tableau 4 sont des coûts moyens qui peuvent, bien sûr, varier en fonction de la technologie utilisée, de la facilité d'installation sur le site, etc.

III- Méthodologie générale, traitements, résultats et analyses

L'objectif spécifique du travail étant de trouver la position idéale des éoliennes qui permet d'obtenir le maximum d'énergie possible, sous les contraintes formalisées dans le tableau 1. Un critère obligatoire à prendre en compte est la ressource éolienne, mesurée par la vitesse des vents en m/s. Dans la municipalité, la vitesse des vents à 30 m varie de 4,45 m/s à 6,758 m/s et on a 12 secteurs avec une valeur différente par secteur. Par ailleurs, les données montrent une très faible variation des vitesses. De plus, les vents de plus grandes vitesses sont fortement concentrés dans la partie Nord, contrairement aux élévations qui sont plutôt plus élevées dans la partie Sud de la municipalité (cf. figure 1 et 2).

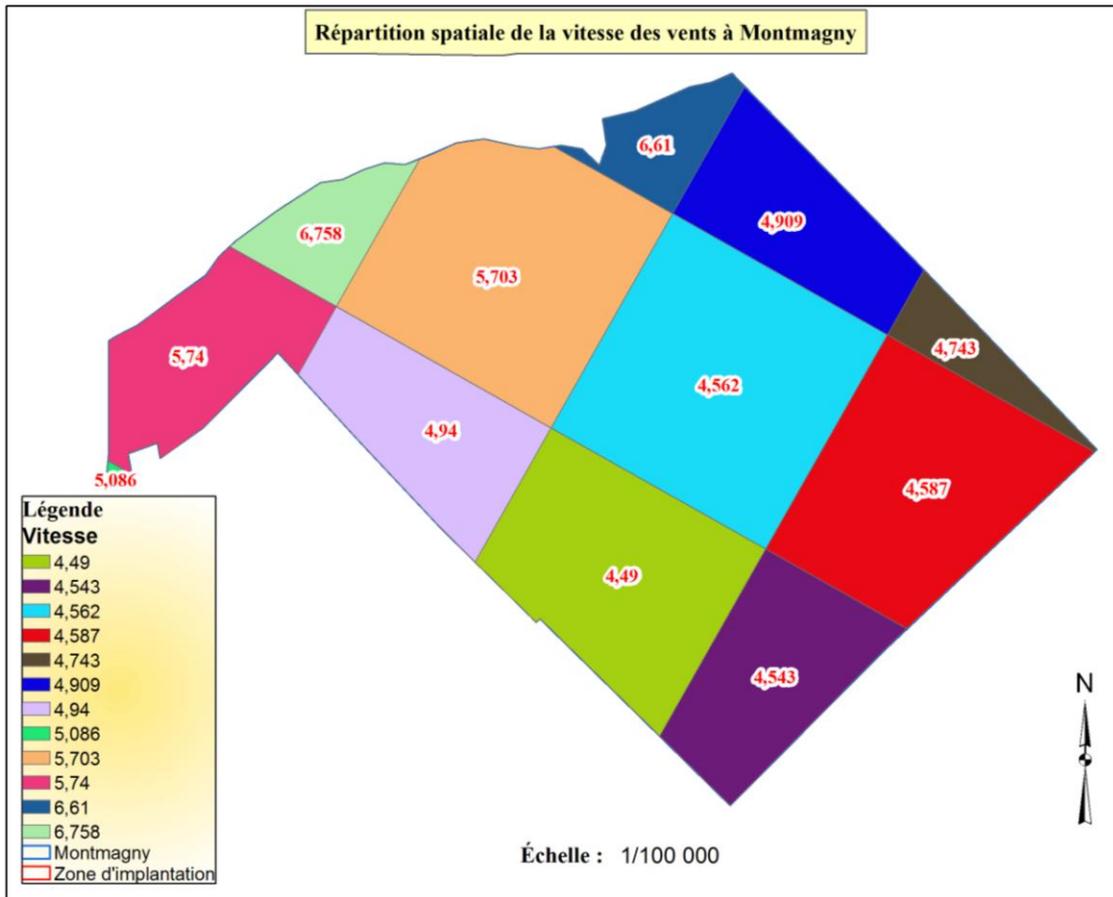


Figure 1: Carte de la vitesse des vents à Montmagny

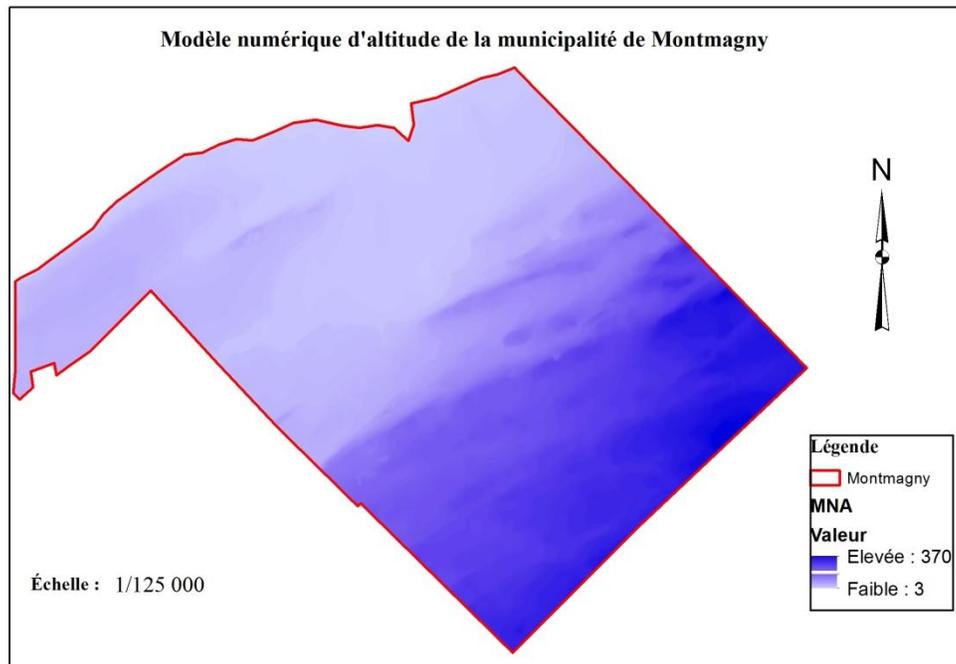


Figure 2 : Modèle numérique d'altitude de la municipalité de Montmagny

Avec une telle répartition, un consensus entre « MNA » et « Vent » ne paraissait donc pas évident, à première vue. En effet, l'attribution d'un coefficient de pondération plus élevé à la couche « Vent » lors du croisement **Vent x MNA**, (0.6 pour « Vent » et 0.4 pour « MNA »), a conduit, certes, à la sélection dans la partie Nord où la vitesse des vents est la plus élevée, mais, dans cette zone, les bâtiments sont très denses, les parcelles cadastrales sont, en grande partie, de taille inférieure à 0.1 ha, et c'est la zone la plus basse (cf. figure 3). Ainsi, une telle pondération ne permettrait donc pas de respecter, au moins trois critères : B₂, B₃ et B₇. Ce qui nous a conduits à relancer le croisement en attribuant, cette fois, la même influence à ces deux couches. Ce changement de niveau d'influence des couches a donné de meilleurs résultats, en termes de possibilité de respects des autres contraintes.

Par ailleurs, il est important de mentionner que, avant le croisement, le « MNA » a été reclassé en fonction de la faible variation des vitesses des vents. Pour ce faire, 12 classes ont été considérées dans chaque couche¹⁴ (cf. figure 3). Plus grand est le numéro de la classe, plus grande est son altitude.

¹⁴ Vu les valeurs très rapprochées des vitesses des vents, nous avons considéré toutes les 12 classes en vue d'être le plus proche possible de l'optimum.

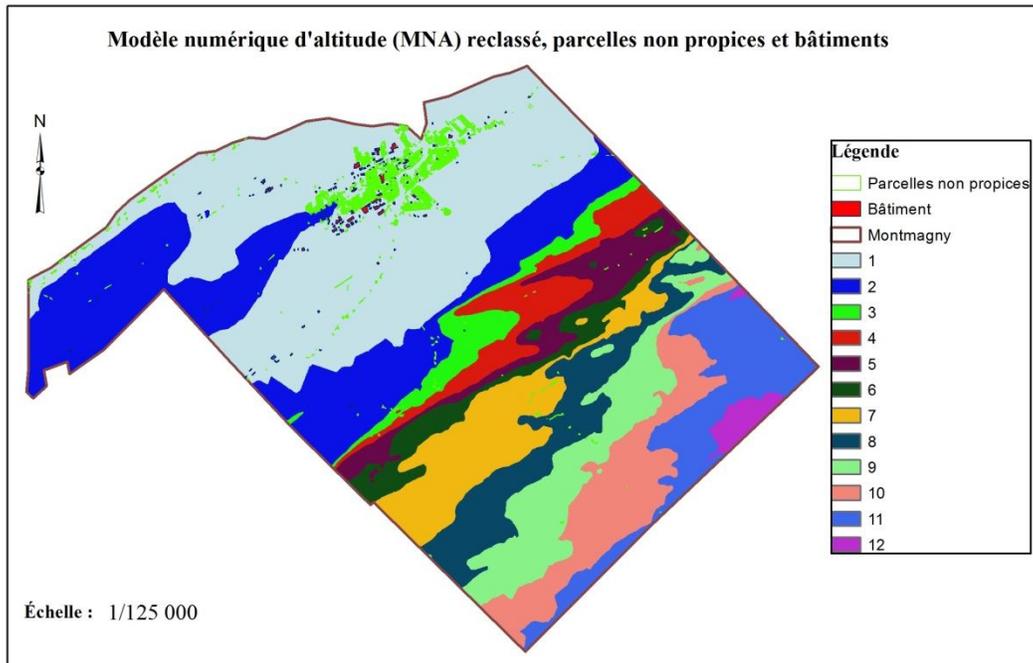


Figure 3 : MNA reclassé, parcelles non propices et bâtiments

Une fois ce croisement, en mode matriciel, réalisé, nous avons converti le résultat en mode vectoriel et fait une superposition avec la « espaces sans arbre (ESA) », générée à partir de la couche « peuplement écoforestiers (D₄) », par simple requête par attributs. La figure 4 ci-après montre la meilleur zone, celle en direction de la flèche rouge. Le lecteur va vite remarquer que le seul meilleur polygone issu du croisement MNA et vent contient des arbres, bien que les parcelles cadastrales ne posent pas de problème à ce niveau. Le lecteur comprendra aussi que l'intersection de « MNA » x « Vent » avec les couches « **Cadastre_type_éolien** »¹⁵ et « **ESA** » va se déplacer. Le réseau hydrographique a été ensuite superposé à cette dernière en vue de s'assurer que nos éoliennes ne soient pas implantées dans des lacs ou cours d'eau, conformément au critère B5 (cf. figure 5).

¹⁵ Le nom est très évocateur et indique qu'il s'agit de parcelles cadastrales répondant au critère B3, c'est -à-dire de taille supérieure à 0.1 ha.

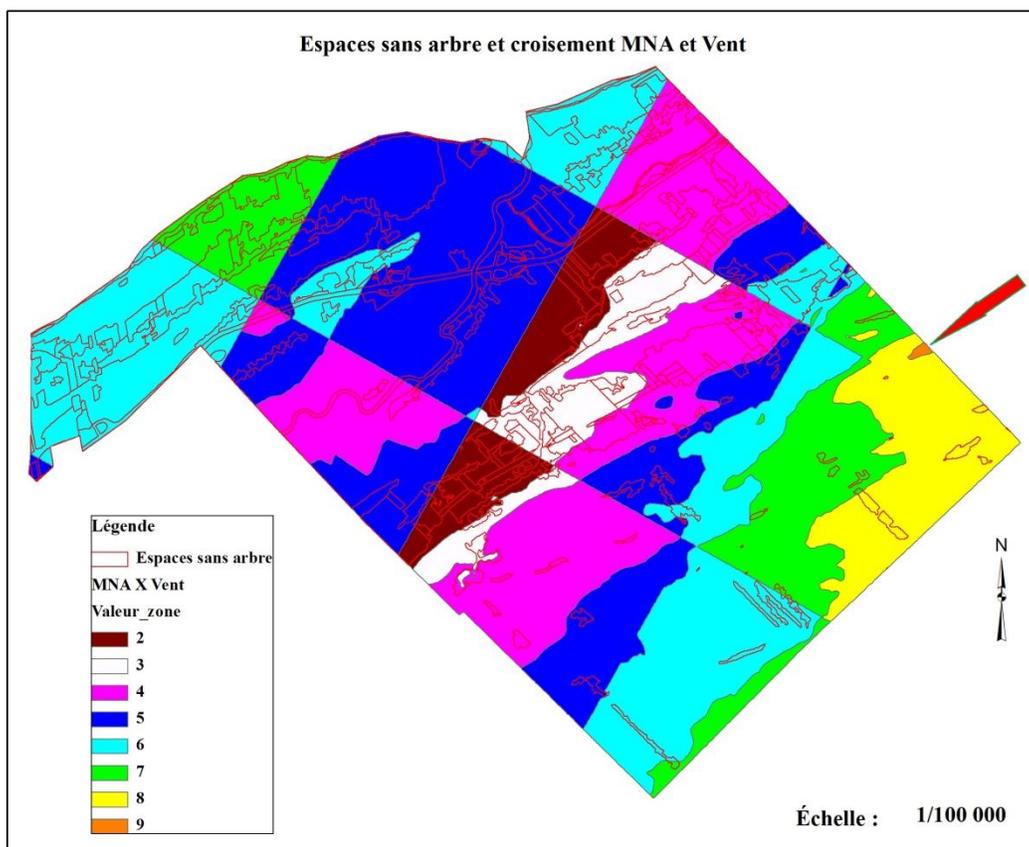


Figure 4: Superposition des espaces sans arbres sur le croisement MNA et Vent

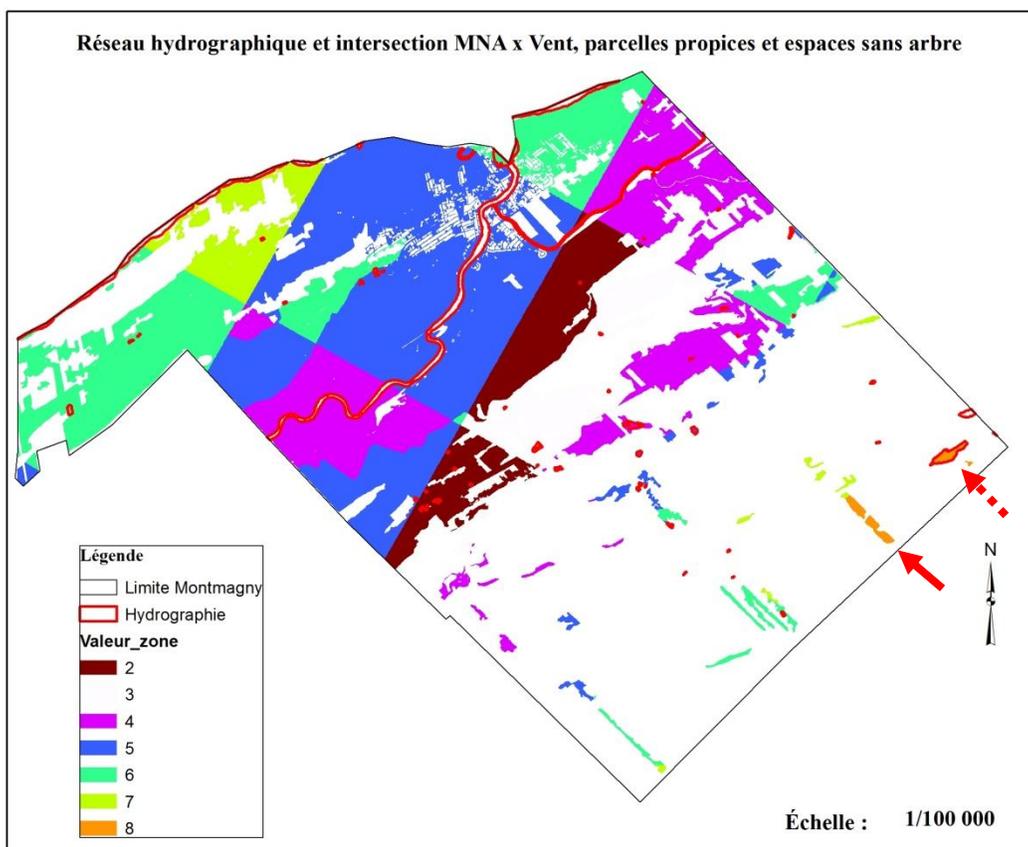


Figure 5 : Superposition du réseau hydro sur l'intersection MNA x Vent, ESA¹⁶ et CTE¹⁷

La meilleure zone issue de l'intersection MNA x Vent, CTE et ESA serait la zone visée par la flèche rouge en pointillée (le plus grand polygone de 9,67 ha), mais on peut vite remarquer que cette zone tombe exactement dans un lac. Du coup, on a eu recours aux deux autres polygones visés par la flèche rouge, en trait plein qui ont eux aussi une superficie relativement intéressante (9,37 et 7,52 ha). Des autres polygones de l'intersection, trois (3) seulement ont une superficie supérieure à 0,1 ha (0,76; 0,28 et 0,12 ha), mais ils sont à cheval entre au moins deux parcelles et donc on ne peuvent recevoir même une petite éolienne de 10 m de hauteur.

Jusqu'à présent, nous optimisons en prenant en compte les 5 premiers critères : B₁ à B₅. Faut-il bien maintenant penser aux cinq (5) autres critères (B₆ à B₁₀). Ces critères, qui dépendent, pour la majorité, de la hauteur des éoliennes, ont été pris en compte, au fur et à mesure, au moment des simulations itératives d'implantation des éoliennes. Ce, par la création des zones tampon autour de chaque éolienne, de rayon égal à la hauteur de l'éolienne correspondante.

¹⁶ ESA : Espaces sans arbres

¹⁷ CTE : Cadastre type éolien

En effet, l'optimisation par rapport aux voies de communication, en vue de nous assurer de l'accessibilité des éoliennes (critère B₆), se fait en positionnant ces dernières, par la création de zones tampon autour des éoliennes de largeur fixée en fonction de la hauteur de l'éolienne correspondante. Ce qui, en même temps, a permis de contrôler les marges de recul par rapport aux parcelles cadastrales voisines, aux arbres, entre les éoliennes et aux bâtiments et donc de contourner les critères B₇ et B₈. Par rapport aux bâtiments, le problème de marge de recul et de bruit (critère B₁₀) ne se pose pas. En effet, la zone optimale simulée avec les 5 premiers critères étant quasi inhabitée et les bâtiments y sont très éloignés.

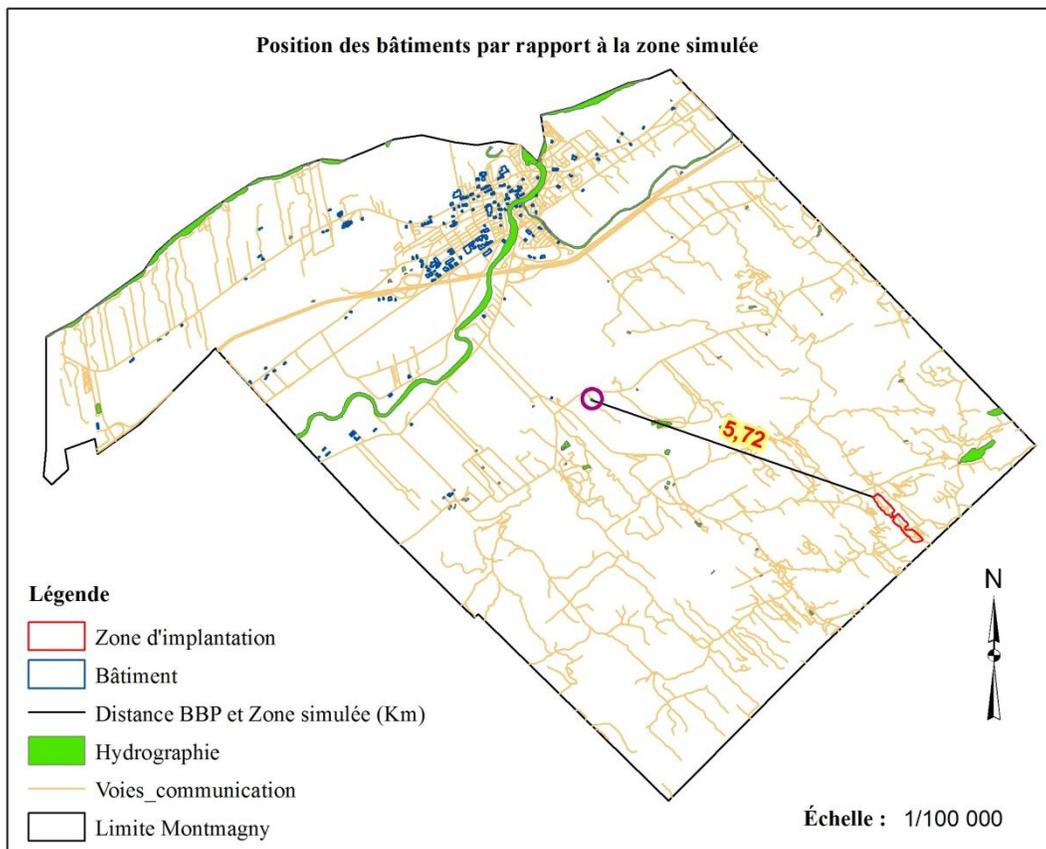


Figure 6 : Position des bâtiments y compris le BPP par rapport à la zone simulée

La figure 6 montre que les bâtiments sont très distants par rapport à la zone simulée nommée ici, « zone d'implantation ». Le BPP, localisé à l'intérieur du cercle mauve se trouve à 5,72 km de la zone. La couche « voies-communication » montre que la zone simulée est très bien desservie. On note aussi une absence de lac et de cours d'eau dans cette zone.

La création des éoliennes a été faite suivant un processus itératif avec beaucoup de simulations. Les itérations ont été réalisées avec non seulement les différentes tailles possibles des éoliennes à un

endroit donné de la zone simulée, mais aussi avec les différentes positions possibles en vue de trouver les positions optimaux permettant de répondre à notre objectif de maximisation tout en respectant les différents critères.

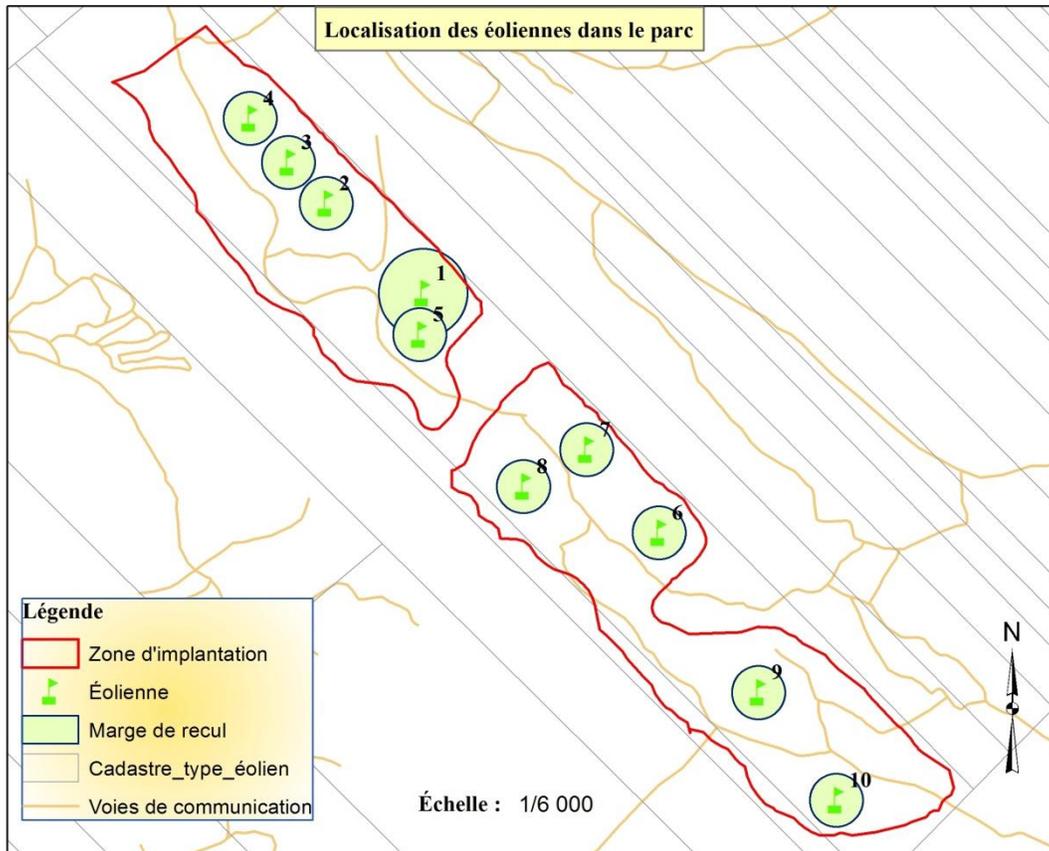


Figure 7 : Localisation des éoliennes dans le parc

Une première éolienne est implantée dans la zone ciblée suivant le respect des cinq (5) premiers critères en tenant compte des marges de recul (par rapport aux arbres, limites des parcelles voisines et voies de communication), de l'accessibilité par rapport aux voies de communication, de la visibilité et du bruit. L'implantation d'une deuxième tient non seulement compte de toutes les contraintes sus-citées, mais aussi de la position et de la hauteur de la première et ainsi de suite, le $n^{\text{ième}}$ tient compte des positions des $n-1$ autres déjà implantées en vue, non seulement, de contrôler le bruit bien que celui-ci n'est pas très contraignant dans notre cas¹⁸. Ce qui se fait en jouant sur la hauteur de l'éolienne, tout en cherchant, bien sûr, à maximiser la hauteur de l'éolienne puisque, à une position donnée (ici un secteur) de la surface terrestre, la vitesse du vent augmente avec la hauteur.

¹⁸ Les bâtiments étant très distants de notre parc.

Une fois toutes nos éoliennes implantées, nous avons effectué à nouveau des analyses de visibilité (vérification du critère B₉) (cf. figure 8) et de bruit (vérification du critère B₁₀).

Pour l'analyse de visibilité, un modèle numérique de surface (cf. Annexe B) a été créé à partir du MNA et du « peuplement écoforestiers »¹⁹.

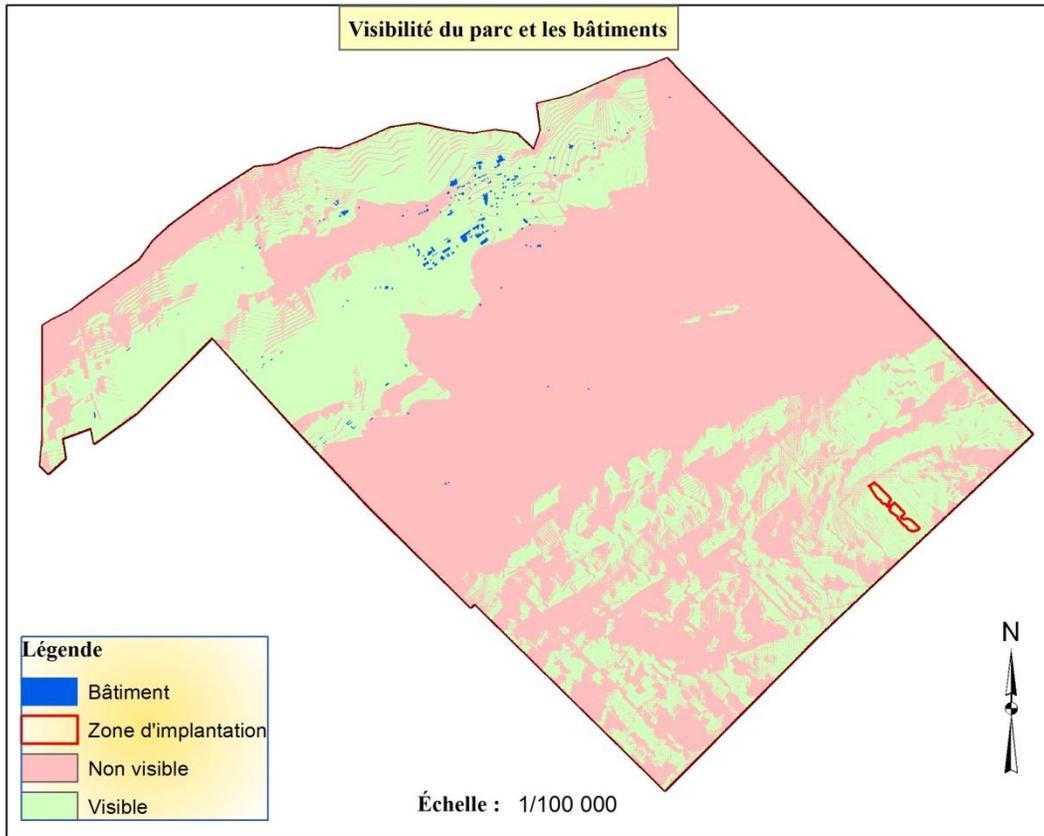


Figure 8 : Visibilité de la municipalité (les bâtiments) par rapport au parc éolien

Bien que, par rapport à la municipalité, la zone non visible parait très importante, mais la figure 8 témoigne d'une grande visibilité des bâtiments et donc du centre ville de la municipalité.

Quant au contrôle du niveau de bruit généré par le parc, deux hypothèses (H₁ et H₂) ont été émises :

H₁ : L'implantation d'une éolienne supplémentaire dans un rayon de 50 m fait augmenter le niveau de bruit ambiant de 3 dB

Cette hypothèse est une forme de simplification du principe de fonctionnement du son selon lequel des niveaux sonores provenant de plusieurs sources ne se cumulent pas de façon arithmétique.

¹⁹ Pour la création du modèle numérique de surface (MNS), nous étions contraints d'utiliser seulement la couche « peuplement » et la couche « MNA », en raison de l'absence de données sur la hauteur des bâtiments.

Ainsi, 45dB + 30 dB ne font pas 75 dB, mais 48dB. Autrement dit, le niveau de bruit le plus faible est masqué presque totalement par le plus élevé dès lors qu'il y a au moins 10 dB d'écart (CETE, 2007)²⁰.

Ce qui conduit à la formule :

$$B_a = B_e + 3(N-1),$$

analogue à la formule du terme général (B_a) d'une suite arithmétique de raison $r = 3$ et de premier terme B_e égal au bruit généré dans un rayon donné ; N étant le nombre d'éoliennes constituant le parc.

Avec cette formule, le brut ambiant de notre parc est de **112 dB**, soit $85 + 3(10-1)$. Le tableau 5 ci-après présente, pour chaque éolienne, ses caractéristiques (puissance et hauteur), ses coordonnées planimétriques et altimétriques et son élévation. La dernière colonne est le bruit cumulé calculé suivant le présupposé de l'hypothèse 1.

Tableau 5 : Positions et caractéristiques des éoliennes implantées

No	Longitude (dd) ²¹	Latitude (dd)	Altitude (m)	Hauteur (m)	Élévation (m)	Vitesse vents (m/s)	Puissance (kW)	Bruit en dB
1	-70,4625	46,9278	325	50	375	5.369	75	85
2	-70,4639	46,9287	321	30	351	4.587	25	88
3	-70,4645	46,9291	319	30	349	4.587	25	91
4	-70,4651	46,9296	315	30	345	4.587	25	94
5	-70,4626	46,9274	326	30	356	4.587	25	97
6	-70,4590	46,9254	340	30	370	4.587	25	100
7	-70,4601	46,9262	338	30	368	4.587	25	103
8	-70,4610	46,9258	338	30	368	4.587	25	106
9	-70,4575	46,9237	344	30	374	4.587	25	109
10	-70,4564	46,9226	346	30	376	4.587	25	112
Total							300	112

En lisant 112 dB dans le tableau 5, le lecteur aurait probablement pensé que ce niveau de bruit dépasse la limite maximale de 85 dB admise et que le critère B_{10} n'est pas respecté. Ainsi, pour éviter toute confusion, nous clarifions que ce niveau de bruit est mesuré à 50 m et que la limite maximale admise est fixée par rapport au bâtiment le plus proche (BPP) qui, dans notre cas, se trouve à environ 5,7 Km

²⁰ http://cartes-bruit.agglo-paysdaix.fr/iso_album/fiche1.pdf

²¹ dd : degré décimale

par rapport au parc (cf. figure 6). Le niveau de bruit du parc par rapport au BPP est calculé grâce à la formule développée à partir de l'énoncé de l'hypothèse 2.

Considérant le prix d'achat, les coût moyens d'installation et d'entretien d'une éolienne (cf. tableau 4) et la puissance totale du parc (cf. tableau 5), les dépenses pour la première année auraient totalisées : **\$ 1.051.000 [= (3500 + 105)*300]**. Avec cette information, il devient facile de juger la pertinence du projet, compte tenu du rendement du parc et du prix actuel du pétrole.

H₂ : Le niveau sonore décroît en fonction du carré de la distance

Pour traduire en termes d'expression mathématique cette hypothèse, nous avons cherché le facteur q par lequel il faut multiplier le bruit généré par une éolienne ou un ensemble d'éoliennes dans un rayon quelconque que l'on note d₀ pour trouver le bruit généré dans un rayon d. Le problème revient à trouver une relation entre B_a, B_e, d₀ et d.

Nous cherchons d'abord la relation entre d et d₀, mais en tenant compte de la formulation de l'hypothèse. Nous voulons trouver un nombre réel n qui satisfait l'égalité :

$$n * d_0 = d,$$

ce qui donne :

$$n = \frac{d}{d_0};$$

Le facteur q est donc donné par :

$$q = \frac{1}{\left(\frac{d}{d_0}\right)^2} \rightarrow q = \frac{d_0^2}{d^2}.$$

D'où, le bruit ambiant (B_a) généré à une distance d, connaissant le bruit (B_e) généré à d₀, est donc donné par **B_a = B_e * $\frac{d_0^2}{d^2}$** ,

telle est la formule utilisée pour le calcul du niveau sonore de notre parc par rapport BPP.

B_e étant le niveau de bruit cumulé calculé par incrémentation suivant la première hypothèse (cf. tableau 5). Ainsi, nous avons :

$$B_a = 112 * \left(\frac{0.05}{5.7}\right)^2$$

$$\boxed{B_a = 0.008618 \text{ dB}}$$

Ce qui est nettement inférieur au niveau maximal de bruit à ne pas dépasser (85dB).

Le tableau 5 ci-après présente une synthèse des traitements et analyses réalisés. Les résultats sont codés dans la dernière colonne (R avec indice), en vue de permettre au lecteur de bien suivre la logique du projet. Toutefois, les codes renvoient aux figures correspondantes.

Tableau 6 : Synthèse des traitements et analyses réalisés

No Données	No Besoin	Traitement	Résultat
D ₁	B ₁	Conversion du format (MIF/MID) de la vitesse des vents en shape et changement du système de coordonnées, création d'une couche matricielle sur la vitesse et reclassification de celle-ci	R ₁ : figure 1
D ₂	B ₂	Découpage, mosaïquage et reclassification du MNA ²²	R ₂ : figures 2 et 3
R ₁ /R ₂	B ₁ et B ₂	Croisement de R ₁ et R ₂ avec la même pondération et conversion du résultat du croisement en vecteur	R ₃ : figure 4
D ₃	B ₃	Création d'une couche cadastrale de taille supérieure à 0.1Ha	R ₄ : figure 5
D ₄	B ₄	Création d'une couche de peuplement sans arbre (H = 0)	R ₅ : figure 4
R ₃ /R ₄ /R ₅	B ₁ , B ₂ , B ₃ et B ₄	Intersection entre R ₃ , R ₄ et R ₅	R ₆ : figure 5
D ₅ /R ₆	B ₅	Superposition, puis soustraction de D ₅ (sur) dans R ₆	R ₇ : figures 5 et 6
D ₃ /D ₄ /D ₇	B ₇ et B ₈	Création de buffers (marge de recul) ²³ autour des éoliennes et calcul des distances par rapport au parc et au BPP	R ₇ : figure 6 et R ₈ : figure 7
D ₃ / D ₄	B ₅	Création d'un MNS ²⁴ pour l'Analyse de visibilité	R ₉ : figure 8 et R ₁₀ : MNS (Annexe B)
H ₁ et H ₂ ²⁵	B ₁₀	Développement d'une formule montrant la variation du bruit avec la distance et l'ajout d'éolienne à un ensemble et calcul du bruit par rapport au BPP	R ₁₁ (voir plus haut)

²² Les données brute du MNA se présentant sous forme de grille, nous avons donc sélectionnés les grilles correspondant à notre zone d'intérêt, passé au mosaïquage, puis au découpage suivant la limite de la municipalité.

²³ Les buffers autour des chaque éolienne a un rayon égal à la hauteur de l'éolienne correspondante (cf. figure 7).

²⁴ Modèle numérique de surface

²⁵ H₁ et H₂ sont les deux hypothèses représentant les bases sur lesquelles le bruit a été calculé

Conclusion

L'objectif du travail était d'évaluer la potentialité de la municipalité Montmagny, en termes de production d'énergie éolienne. De manière spécifique, nous cherchions à identifier la position optimale d'implantation d'un ou de plusieurs parc éoliens formant un total de 10 éoliennes qui permettraient d'obtenir le maximum d'énergie possible.

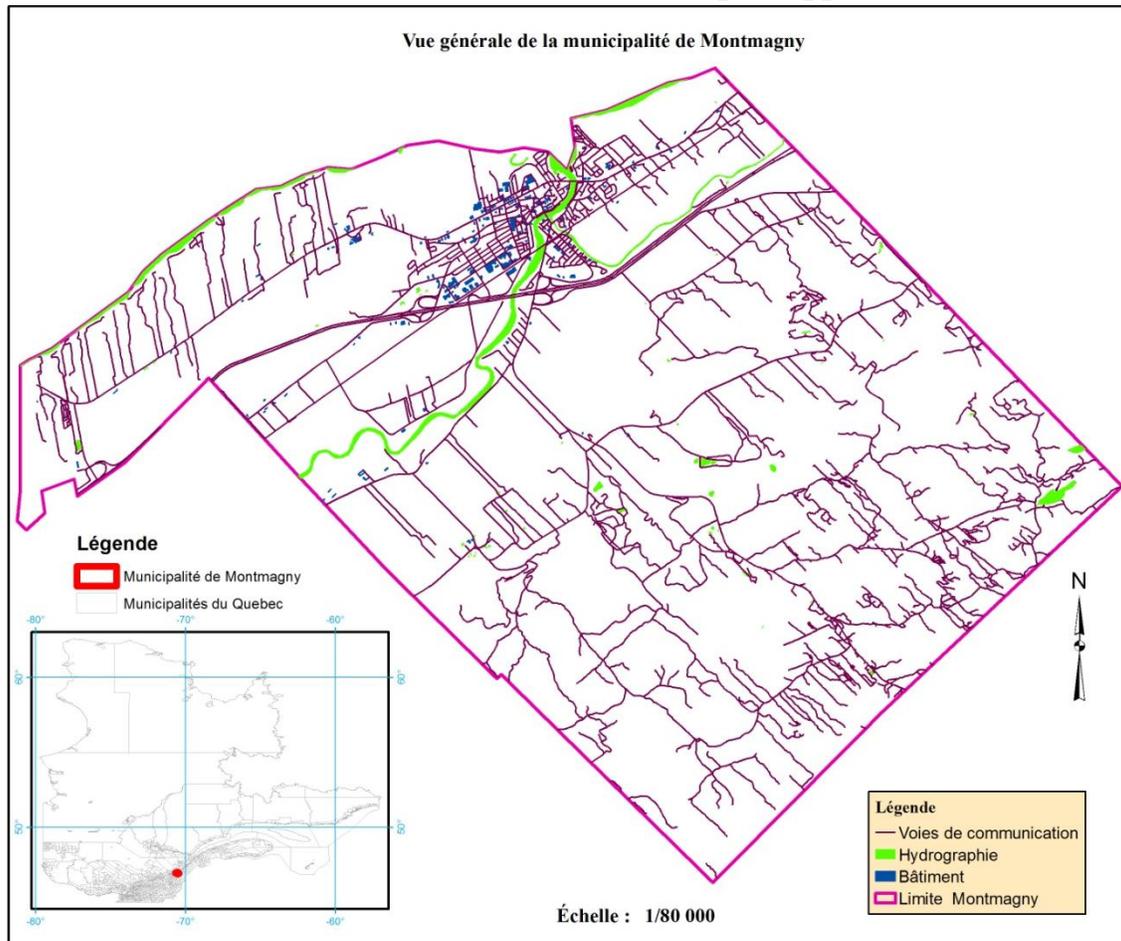
La prise en compte d'un ensemble de contraintes obligatoires à respecter, tels que mentionnés dans le tableau 2, nous a permis de simuler la position optimale d'un parc de 10 éoliennes dont un (1) de 50 m et neuf (9) de 30 m. Ce parc est donc potentiellement capable de produire 300 kW par heure. Il faut, toutefois, rappeler au lecteur que l'énergie produite dépend de nombreux autres paramètres comme la météo ou les opérations de maintenance nécessaires. Le rapport de charge, rapport entre la production effective et la production maximale théorique, est couramment utilisé comme indicateur de l'énergie produite par une installation. Nous voulons aussi mentionner que la municipalité offre la possibilité d'implanter au moins deux autres petites éoliennes, mais étant donné que nous étions contraints à un maximum de 10 éoliennes, nous avons laissé tomber cette possibilité offerte par la zone. Mais, ce qui est convainquant, c'est que nous avons choisi la position de nos éoliennes sur le site identifié de manière à ce qu'il n'existe aucun autre endroit dans de la municipalité qui pourrait offrir la possibilité d'installer 10 éoliennes avec une production potentielle d'énergie éolienne supérieure à 300 kW, si bien évidemment, on doit respecter les critères du tableau 2. Nous avons vérifié que l'énergie potentielle déterminée pour notre parc est très sensible à un changement de position d'au moins un de nos éoliennes, ce qui a renforcé notre certitude sur les emplacements optimaux de ces dernières.

Les quelques autres zones d'installation sont très dispersées, et de plus elles sont très contraignantes, non seulement en termes de choix dans la taille des éoliennes, mais aussi en termes d'accessibilité.

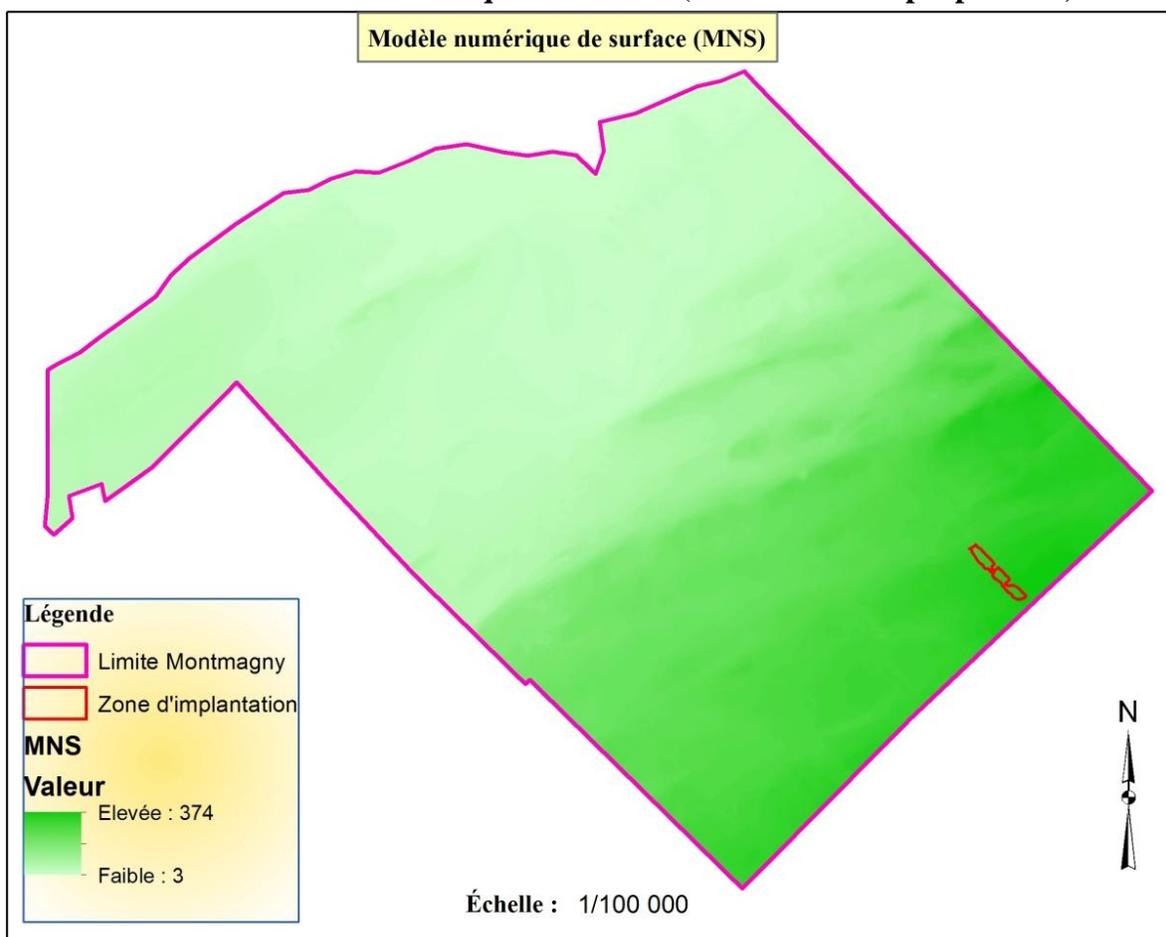
Ayant abouti à la valeur estimée du coût annuel de mise en œuvre du parc éolien (achat, services d'installation et d'entretien) de l'ordre de 1 million de dollars, ce travail permet à un entrepreneur intéressé de se faire une idée de la rentabilité financière d'un tel projet. Toutefois, la décision finale doit aussi tenir compte d'autres aspects importants, mais qui n'ont pas été abordés (d'ailleurs, ce n'était pas l'objectif du travail), entre autres, prix de la terre, l'acceptabilité sociale, la valeur agronomique de la zone simulée.

Annexes

Annexe A : Localisation de la zone d'intérêt par rapport à Québec



Annexe B : Modèle numérique de surface (MNS = MNA + peuplement)



Annexe C : Zones d'absence d'arbre et d'implantation du parc éolien

