

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE DANS LE CANTON DU JURA

Elaboration d'un plan de base
sur le potentiel éolien du Canton du Jura

Rapport final sans annexes – Novembre 2002

Sur mandat de



REPUBLIQUE ET CANTON DU JURA
SERVICE DES TRANSPORTS ET DE L'ÉNERGIE
SERVICE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

SOMMAIRE

Situation et objectifs	5
<i>Objet de l'étude</i>	5
<i>Coordination avec le plan directeur cantonal</i>	6
<i>Aspects de politique énergétique cantonale</i>	6
Démarche de l'étude	8
<i>Introduction</i>	8
<i>Démarche pour la sélection des sites</i>	9
Critères techniques pour l'implantation d'éoliennes	15
<i>Introduction</i>	15
<i>Information sur les critères</i>	16
Les éoliennes aujourd'hui	19
Contexte politique et économique en Suisse et en Europe	23
<i>Comparaison Suisse – pays frontaliers</i>	23
<i>Analyse de la situation actuelle</i>	24
<i>Le futur de l'énergie éolienne en Suisse</i>	27
Contexte du Canton du Jura	29
<i>Le vent</i>	29
<i>L'environnement</i>	43
<i>Le paysage</i>	46
Résultats	48
<i>Généralités</i>	48
<i>Sélection des sites</i>	49
Potentiel pour le Canton du Jura	56

2. 2. 2. 2. 2.

The first part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The second part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The third part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The fourth part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The fifth part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The sixth part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The seventh part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The eighth part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The ninth part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function. The tenth part of the paper is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ defined by the equation $f(x) = \int_0^x f(t) dt$. It is shown that $f(x)$ is a constant function.

SITUATION ET OBJECTIFS

OBJET DE L'ETUDE

En vue d'établir leur plan directeur cantonal, les cantons définissent, entre autres, l'état et le développement souhaité de l'approvisionnement énergétique. Le mandat attribué par le Département de l'environnement et de l'équipement, en collaboration avec le Service de l'aménagement du territoire et le Service des transports et de l'énergie de la République et Canton du Jura, se situe au niveau des études de base nécessaires à la révision de la planification directrice cantonale, ceci en application de l'article 6 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT).

La démarche consiste à :

- évaluer le potentiel en énergie éolienne;
- déterminer les zones potentiellement intéressantes pour l'énergie éolienne.

Le 22 mai 2002, le Parlement jurassien a adopté un arrêté fixant les principes directeurs et les objectifs d'aménagement du territoire applicables à la révision du plan directeur cantonal. L'objectif n°20 entend *"encourager la diversification énergétique en privilégiant les agents indigènes et renouvelables"*. La présente étude compte donc fournir une réponse opérationnelle du point de vue territorial à l'objectif susmentionné.

En vue de déterminer les principes d'aménagement ainsi que les mesures visant à assurer la coordination dans le domaine de l'implantation d'éoliennes, l'étude met en évidence les données de fait et de droit ainsi que les risques de conflits prévisibles dans l'utilisation du sol.

En désignant les sites potentiellement intéressants pour le développement de l'énergie éolienne – du point de vue des caractéristiques du vent, des possibilités d'utiliser rationnellement l'énergie produite ainsi que du point de vue des contraintes liées à la nature et au paysage – l'étude permet de compléter le plan directeur cantonal conformément à son mandat de gestion et de coordination des activités ayant des effets sur l'organisation du territoire. Elle aide aussi les producteurs

d'énergie à mener une politique cohérente en connaissant par avance les conditions territoriales à l'octroi des autorisations en matière de construction.

COORDINATION AVEC LE PLAN DIRECTEUR CANTONAL

Une bonne documentation, constituée par les études de base notamment, aide à la mise en place d'une organisation spatiale judicieuse et à une coordination des politiques stratégiques et des activités à incidence spatiale adaptée aux problèmes réels. Ceci permet de réduire les coûts de construction et d'entretien, de construire de façon déterminante à prévenir les atteintes à l'environnement et de simplifier et accélérer le déroulement des procédures. Une planification bien coordonnée réduit les risques d'oppositions ultérieures. Le plan directeur cantonal représente ainsi un instrument d'information, de collaboration et de résolution des conflits.

L'étude relative à l'évaluation du potentiel en énergie éolienne procède de cette volonté.

Partie intégrante de la planification directrice cantonale, l'étude fournit les informations nécessaires à la rédaction du plan directeur cantonal - fiche: énergie éolienne - comprenant :

- les principes d'aménagement;
- les décisions relatives à la façon de coordonner;
- les informations nécessaires à la compréhension de ces données.

Les informations cartographiques permettent de dresser la carte du plan directeur cantonal.

ASPECTS DE POLITIQUE ENERGETIQUE CANTONALE

Le soutien à l'énergie éolienne s'inscrit dans la politique plus globale de promotion des énergies renouvelables que développe le Gouvernement, conformément aux dispositions de la loi et de l'ordonnance sur l'énergie.

Dans le domaine des énergies renouvelables, le Canton du Jura n'est pas en reste. Il déploie des efforts, en faveur du bois-énergie notamment, en soutenant de manière conséquente la réalisation du réseau de chaleur à distance de Porrentruy.

Pour le Gouvernement, le choix des énergies non polluantes et renouvelables s'impose à toute politique destinée à lutter pour l'environnement, tout en sachant qu'elles demandent encore d'importants délais pour être pleinement opérationnelles. Il est convaincu d'ailleurs que l'énergie éolienne sera capable, à l'avenir, d'apporter une contribution significative, en tant qu'énergie de substitution.

Par ailleurs, la politique énergétique du Canton du Jura s'inscrit dans une politique environnementale où la protection des sites et du paysage est prise en compte dans la pesée des intérêts. L'énergie renouvelable et propre des éoliennes est un pas en direction d'un développement durable, mais son impact sur l'environnement, en particulier sur le paysage, n'est pas négligeable et doit être mis en balance avec le gain environnemental d'une énergie renouvelable.

Le Gouvernement soutient cette procédure qui vise à évaluer de manière globale les potentialités de l'énergie éolienne sur le territoire cantonal et à déterminer, en concertation avec les communes, les propriétaires des terrains et les organisations de protection de la nature, du paysage et du patrimoine, les sites les plus appropriés pour y implanter des éoliennes.

DEMARCHE DE L'ETUDE

INTRODUCTION

L'étude comporte deux parties principales. La première traite des aspects de l'énergie éolienne dans un contexte technologique et politique, tant au niveau européen qu'à l'échelle de la Suisse. Cette partie inclut aussi une évaluation du potentiel éolien du territoire jurassien.

La seconde partie est consacrée plus spécifiquement à la recherche de sites potentiellement intéressants pour l'exploitation économique du vent. La démarche suivante a été adoptée pour définir les sites potentiels :

1. Sélection d'après la carte « Potentiel éolien du canton du Jura »
2. Sélection avec le programme WINFO de Meteotest, donnant la vitesse moyenne des vents
3. Sélection d'après la carte des altitudes du Jura
4. Etude des sites potentiels sur des cartes topographiques au 25'000 et une carte orthophoto au 50'000
5. Visite des sites potentiels et récolte des informations
6. Création d'une base de donnée des sites visités sur la base des critères retenus pour la sélection de site
7. Définition et description générale des régions potentiellement intéressantes
8. Choix des régions offrant le meilleur potentiel
9. Choix des sites les plus appropriés de chaque région

Les différents points énumérés ci-dessus, permettant d'établir la liste des sites sélectionnés, sont repris en détail dans ce chapitre.

DEMARCHE POUR LA SELECTION DES SITES

Carte du potentiel éolien du Canton du Jura

Cette carte (Figure 1) réalisée par les bureaux Meteotest, Ökoskop et Enco, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) en 1998, montre les zones les mieux exposées au vent et indique la vitesse moyenne du vent à 10 m au-dessus du sol.

Elle sert de point de départ pour l'identification des sites à visiter.

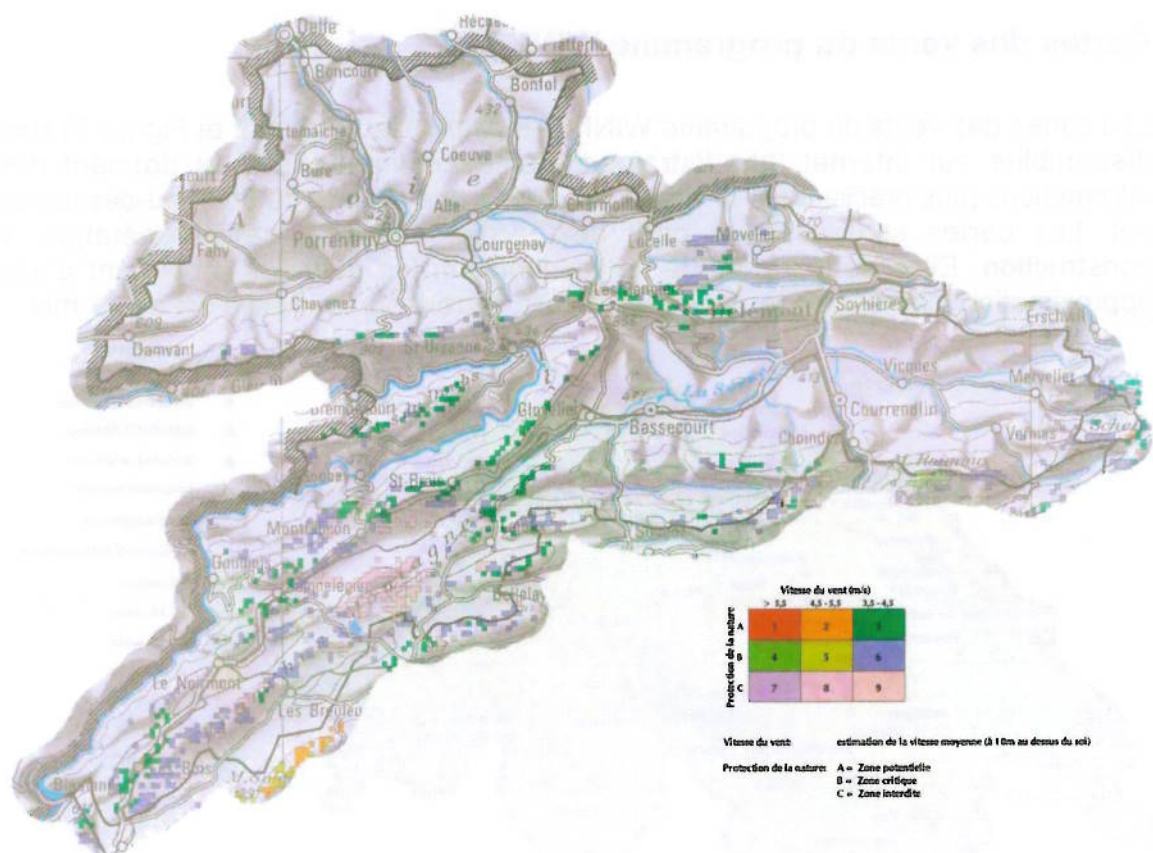


Figure 1 : Carte des zones de potentiel éolien du Canton du Jura. © OFEN.

On remarque que le Canton du Jura ne possède aucune zone avec des vents supérieurs à 4.5 m/s. Les zones visibles dont les vitesses de vent sont plus élevées n'appartiennent plus au territoire du Canton. Ces zones ont des vitesses de vent plus importantes, car elles sont situées à des altitudes plus élevées.

Les critères liés au vent sont définis¹ comme suit pour cette carte

Vitesse moyenne à 10 m de haut	Commentaires
< 3.5 m/s	Zones non appropriées
3.5 m/s – 4.5 m/s	Conditions moyennes
4.5 m/s – 5.5 m/s	Bonnes conditions
> 5.5 m/s	Très bonnes conditions

Cartes des vents du programme WINFO

Les cartes des vents du programme WINFO de Meteotest (Figure 2 et Figure 3) sont disponibles sur internet (<http://stratus.meteotest.ch/mme/winfo>) et donnent des informations plus précises sur la vitesse du vent à une altitude de 50 m au-dessus du sol. Les cartes sont conçues pour des terrains ouverts, sans végétation ni construction. Elles sont à prendre à titre indicatif, les données provenant d'une approximation mathématique. Selon Meteotest, l'erreur sur la vitesse est de ± 1 m/s.



Figure 2 : Carte de la vitesse des vents WINFO à 50 m au-dessus du sol sur l'ensemble de la Suisse, calculée à partir d'un modèle mathématique et de relevés de stations météorologiques. © Meteotest.

Les vitesses du vent prévues par le programme WINFO vont jusqu'à 5.3 m/s pour le Canton du Jura. Les zones jaunes de la carte représentent les régions bénéficiant des meilleures conditions de vent. Il existe une forte relation entre la vitesse du vent et l'altitude, avec un gradient de 0.37 m/s par 100 mètres d'altitude. Ainsi les zones jaunes sont situées au-dessus de 900 m d'altitude, alors que les rouges,

¹ Publication *Planification d'installations éoliennes*, Office fédéral de l'énergie.

représentant des conditions de vent meilleures que les jaunes, sont situées entre 1250 m et 1607 m (Chasseral) et donc hors du Canton du Jura.

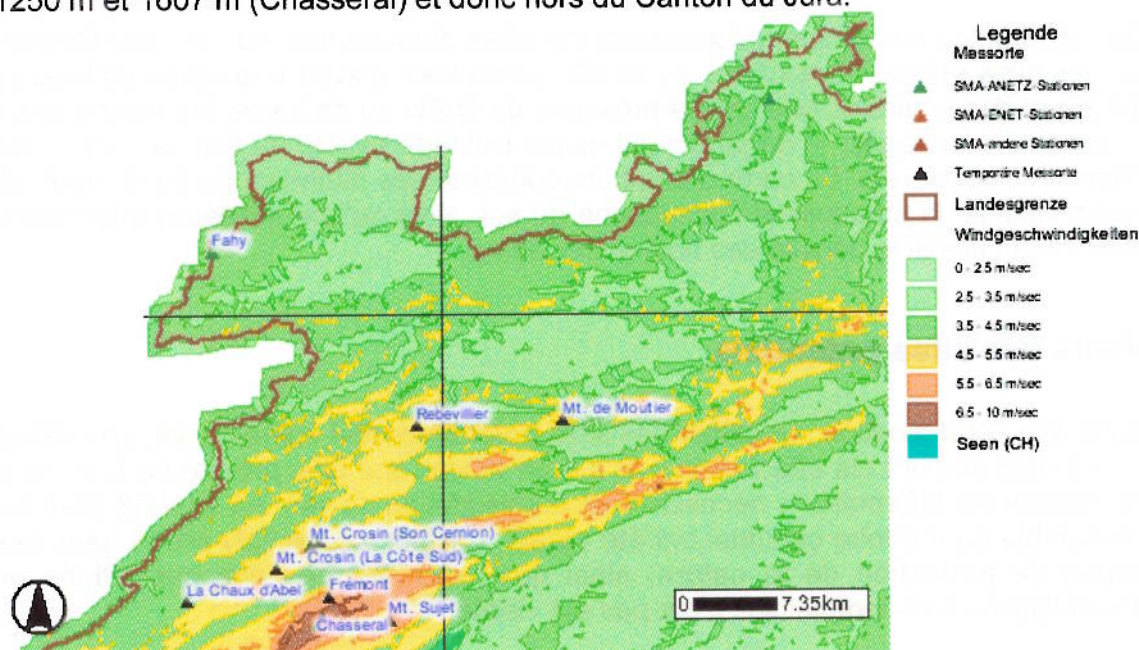


Figure 3 : Carte de la vitesse des vents WINFO à 50 m au-dessus du sol pour le Canton du Jura et ses environs. © Meteotest.

Carte des altitudes du Canton du Jura

La carte des altitudes (Figure 4), corrélée avec la carte de la vitesse des vents, donne une bonne indication de la variabilité du vent en fonction de l'altitude. Elle permet aussi d'avoir rapidement un aperçu global des différentes altitudes du canton et donc des zones potentiellement intéressantes d'un point de vue éolien.

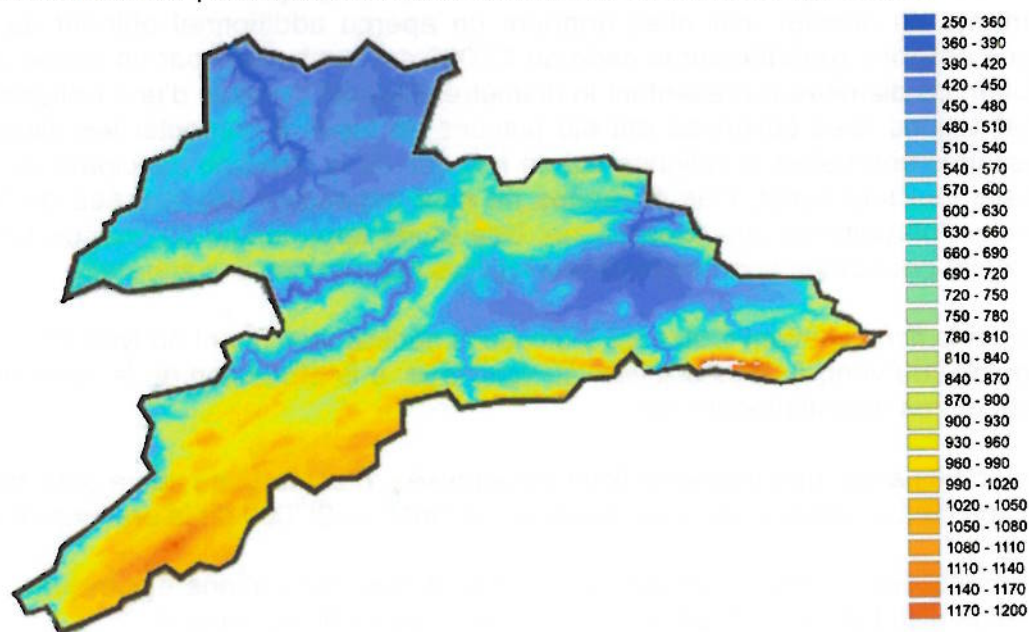


Figure 4 : Carte des altitudes du Canton du Jura.

Cartes 25'000 et orthophoto 50'000

Ces différentes cartes sont nécessaires, car elles donnent des indications détaillées sur les sites retenus. Les cartes au 25'000 permettent d'avoir une vision globale du terrain et des environs, telle que la présence de forêts ou de haies, les habitations à proximité, les villages, le dégagement visuel, l'altitude exacte du site, la nature des chemins d'accès, etc. La carte orthophoto complète ces informations en donnant de façon visuelle la structure et l'occupation du sol, ainsi qu'une meilleure information quant à la taille et la densité des bois et des haies.

Visite des sites potentiels

Suite à la détermination sur cartes des sites potentiellement intéressants, des visites sur chaque site ont été effectuées, afin d'avoir *in visu* une idée précise de la zone et de récolter les informations nécessaires à la description du site. Au total 38 sites sur l'ensemble du territoire cantonal ont été visités. Les sites potentiels situés dans des zones de protection de la nature, ainsi que ceux proches des habitations ou d'installations non-compatibles n'ont pas été visités.

Base de donnée des sites

Pour chaque site, différentes fiches ont été remplies, contenant le descriptif du lieu en rapport avec les critères retenus pour la sélection des sites.

Une première fiche explicite la situation géographique du site par un extrait d'une carte au 25'000, une photographie d'une ou plusieurs directions importantes depuis le site, les coordonnées fédérales de l'endroit d'où a été prise la photographie, ainsi qu'un exemple d'implantation d'éoliennes. Les photographies sont des éléments importants du dossier, car elles donnent un aperçu additionnel objectif du site. Chaque éolienne reportée sur la carte au 25'000 est symbolisée par un cercle rouge de 300 m de diamètre représentant le diamètre d'impact possible d'une éolienne sur les habitations. Ces éoliennes ont été placées de façon à respecter les distances nécessaires entre elles et l'alignement en fonction de la direction principale du vent, normalement sud-ouest. Ces éoliennes ne sont cependant pas placées de façon optimale d'un point de vue énergétique. Une étude approfondie de chaque site est nécessaire pour déterminer les positions les plus appropriées des appareils.

La seconde fiche contient toutes les indications nécessaires quant au type de terrain, à la qualité du vent, à l'accessibilité, au voisinage, à la protection de la zone et aux infrastructures touristiques du site.

Pour certains sites, une troisième fiche est annexée, montrant une vue à 360° depuis l'emplacement marqué d'une croix bleue sur la carte au 25'000 de la première fiche.

Finalement, des cartes au 25'000 des lignes et des installations électriques de la société de distribution FMB SA sont aussi annexées en fin de rapport.

Toutes les fiches concernant les sites visités sont données en annexe et le détail des critères d'évaluation choisis est expliqué dans le chapitre *Critères*.

Définition et description des régions potentiellement intéressantes

Les sites ont été classés par microrégions possédant des caractéristiques homogènes. La découpe du territoire cantonal en microrégions (Figure 5) est celle utilisée dans la *conception directrice* du plan directeur cantonal, car elle se prête bien à la classification des sites dans le cadre d'une approche éolienne.

Onze microrégions ont ainsi été définies

1. Basse-Allaine
2. Vendline-Coeuvatte
3. Haute-Ajoie
4. Porrentruy
5. Baroche
6. Clos du Doubs
7. Delémont
8. Haute-Sorne
9. Val Terbi
10. Saignelégier
11. Le Noirmont

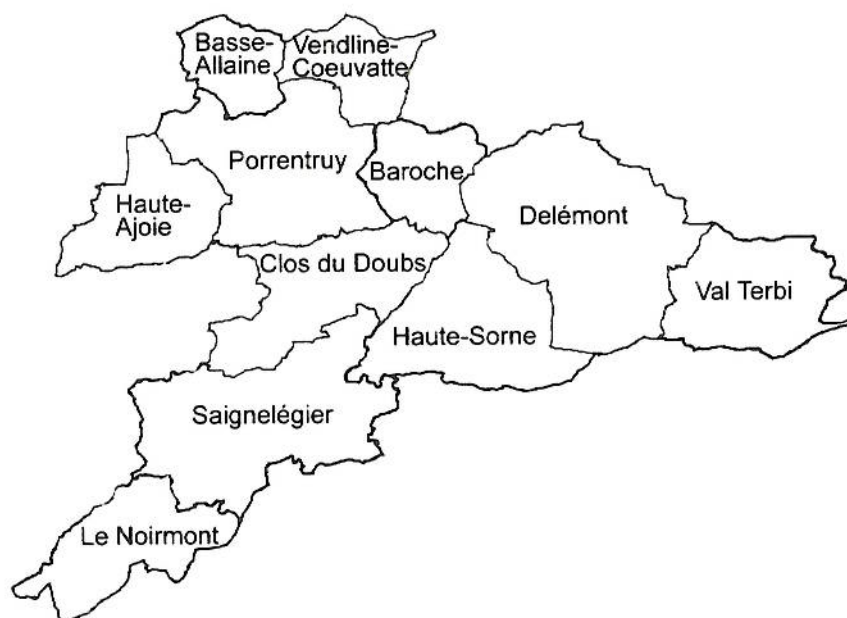


Figure 5 : Microrégions telles que définies dans la *conception directrice* du plan directeur cantonal.

Ces microrégions sont décrites et analysées du point de vue du potentiel éolien dans le chapitre traitant des résultats.

Choix des microrégions offrant le meilleur potentiel

Une fois l'ensemble des microrégions du territoire cantonal définies et analysées, un choix est établi, en tenant compte des observations effectuées sur le terrain et de la concordance avec les critères de sélection choisis.

Choix des sites les plus appropriés de chaque microrégion

Enfin, à l'intérieur des microrégions, des sites ont été sélectionnés, car ils présentent les meilleures chances de succès au vu de la faisabilité et de la technologie actuelle.

CRITERES TECHNIQUES POUR L'IMPLANTATION D'EOLIENNES

INTRODUCTION

Afin de sélectionner les sites intéressants pour l'implantation d'éoliennes dans le Canton du Jura, divers critères ont été retenus et analysés pour chaque site visité. La liste des critères choisis est donnée ci-dessous.

1. Terrain

- Type
- Surface approximative
- Biotopes

2. Qualité du vent

- Situation
- Dégagement
- Altitude moyenne
- Obstacles
- Vitesse à 50 m d'altitude au-dessus du sol

3. Accessibilité

- Voies d'accès
- Contraintes d'accès
- Aménagements requis

4. Voisinage

- Habitations sur le site
- Villages
- Autres
- Impact sonore
- Impact stroboscopique
- Impact visuel rapproché

5. Installations électriques

- Ligne 16 kV la plus proche
- Fournisseurs
- Autres installations

6. Protection de la zone

7. Infrastructures touristiques

Une explication détaillée de chaque critère énuméré est donnée ci-après.

INFORMATION SUR LES CRITERES

Le terrain

Le terrain sur lequel aura éventuellement lieu l'implantation d'éoliennes est important, car il définit déjà partiellement la qualité du vent, l'accessibilité, la taille du parc éolien, ainsi que les éventuelles études d'impact sur la faune et la flore devant être réalisées.

Pour ce critère, plusieurs points ont été mis en évidence :

- le **type** de terrain, c'est-à-dire l'occupation actuelle du sol ;
- la **surface approximative** pouvant accueillir des éoliennes, donnant une idée du nombre de machines potentiellement constructibles sur le site ;
- les **biotopes** présentant un intérêt du point de vue de la faune et de la flore et situés sur le site, ou à proximité immédiate.

La qualité du vent

La qualité du vent est le critère essentiel pour la détermination des sites intéressants. En effet, la quantité d'énergie produite par une installation éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. C'est finalement la vitesse du vent qui va contribuer de façon la plus importante à la rentabilité économique d'un site. Dans le cas présent, seul l'aspect qualitatif des conditions éoliennes est évalué. Des

mesures *in situ* des vitesses du vent durant plusieurs mois et jusqu'à une année, ainsi que la comparaison avec des mesures réalisées à long terme par une station météorologique dans les environs du site choisi, sont nécessaires pour évaluer quantitativement le potentiel éolien.

La qualité du vent est déterminée par :

- la **situation** du site par rapport à son entourage, c'est-à-dire sa topographie ;
- le **dégagement** visuel depuis le site dans toutes les directions et plus spécialement vers le sud-ouest, l'ouest et le sud, qui sont les directions principales du vent ;
- l'**altitude moyenne** du terrain, celle-ci ayant une influence sur la vitesse du vent pour une région comme le Jura ;
- les **obstacles** situés à proximité immédiate ou sur le site lui-même et qui pourraient agir comme perturbateur du vent ou de son homogénéité ;
- la **vitesse à 50 m** au-dessus du sol montre la vitesse du vent telle que calculée par le programme WINFO et fournit donc une estimation de la vitesse moyenne sur le site.

L'accessibilité

Il est important de tenir compte de l'accessibilité, car elle va définir en partie la faisabilité technique et économique du site. Un site difficilement accessible va générer des coûts d'aménagement élevés et des procédures administratives pour la construction ou l'amélioration des voies d'accès. Les critères d'accès peuvent changer en fonction de la taille et donc du poids des appareils à installer. Dans le cadre de cette étude, les accès sont décrits de manière objective, ne fixant ainsi pas de poids maximum à observer.

L'accessibilité a été mesurée comme suit :

- les **voies d'accès** illustrent la qualité du revêtement actuellement utilisé : bitume, béton, cailloux, terre ou herbe ;
- les **contraintes d'accès** énumèrent les obstacles au transport des installations éoliennes, comme les virages excessivement serrés ou la déclivité trop importante de la route ;
- les **aménagements requis** dressent une liste des différents travaux nécessaires pour compléter ou améliorer l'accès au site.

Le voisinage

Le voisinage est un critère important surtout par l'effet psychologique pouvant être provoqué par les éoliennes chez certaines personnes. Le plus gros impact qu'elles génèrent est en effet visuel. De par leur taille, leur mouvement et leur exposition, elles sont très visibles. Les autres effets, comme le bruit généré et l'ombre portée, sont limités à un voisinage immédiat, normalement situé à moins de 300 m de l'appareil.

Afin de quantifier l'impact sur le voisinage, les critères suivant ont été retenus :

- les **habitations** situées directement sur le site ou en bordure de celui-ci ont été répertoriées ;
- les **villes ou villages** situés dans un rayon de 2 km autour du site ont aussi été répertoriés ;
- d'**autres constructions**, comme les installations militaires ou toutes autres installations présentes sur le site sont énumérées ;
- l'**impact sonore** sur les habitations relevées ci-dessus est décrit ;
- l'**impact stroboscopique** sur ces mêmes constructions est lui aussi décrit ;
- finalement l'**impact visuel rapproché** est analysé, c'est-à-dire qu'une liste des quartiers des villes ou villages situés à moins de 2 km du site et ayant une vue directe sur celui-ci est dressée.

Les installations électriques

Pour le transport du courant vers le consommateur, l'injection de l'électricité produite au réseau est nécessaire. Afin de pouvoir effectuer cette connexion, il faut connaître la capacité et la proximité des lignes de moyennes et de basses tensions déjà présentes, ou déterminer celles qu'il faudrait construire. Une carte des installations électriques existantes est donc utile dans ce contexte. Des extraits de cartes au 25'000 montrant le réseau électrique des FMB SA et de la Goule SA sont donnés en Annexe 7.

Les données relevées concernent :

- la distance à laquelle se trouve la **ligne 16 kV la plus proche** ou la plus accessible, ces lignes étant celles employées pour le transport du courant d'origine éolienne ;
- le nom du **fournisseur** actuel d'électricité pour la région du site ;
- l'existence éventuelle d'**autres installations** électriques importantes pour le choix des sites, comme des antennes de télécommunication.

La protection de la zone

Le degré et la forme de protection du site sont primordiaux, car l'installation d'éoliennes requière l'obtention de permis de construire, qui sont accordés en fonction de la **classification** de la zone. Des démarches administratives en vue d'obtention de dérogations peuvent être nécessaires.

Les infrastructures touristiques

Une brève **liste** des infrastructures ou des lieux touristiques se trouvant dans la région du site est répertoriée, principalement du fait que les éoliennes génèrent un intérêt de la part des gens et peuvent donc avoir un impact sur le tourisme local.

„Wind power works, it is time for politicians to do the same..“

Rapport Greenpeace et EWEA pour le Sommet mondial du développement durable, Bali, 2002.

LES EOLIENNES AUJOURD'HUI

Durant les vingt dernières années, le développement dans le domaine de l'énergie éolienne s'est fortement accéléré. Il y a dix ans seulement, la puissance des appareils commercialisés aujourd'hui et l'essor de cette forme de production d'énergie, notamment en Europe, n'était pas imaginable pour la plupart des spécialistes.

Le principal axe de développement s'est focalisé sur la puissance des génératrices et le design des appareils, pour optimiser l'énergie produite par m² de surface balayée par le rotor. Les changements apparus entre les technologies utilisées dans le passé et les appareils dont nous disposons aujourd'hui (Figure 6 et Figure 7) expliquent le succès phénoménal de l'énergie éolienne au niveau mondial.



Figure 6 : Eolienne de faible puissance, près de Beringen (SH). © Suisse Eole.



Figure 7 : Exemple à l'arrière plan d'une éolienne moderne à rotor à trois pâles. La personne assise au premier plan se trouve à 100 m au-dessus du sol, sur la nacelle d'un deuxième appareil de 1.8 MW.

L'accroissement de la puissance, liée à des tailles d'éoliennes de plus en plus grandes, ont influencé de manière significative les aspects suivants :

- La rentabilité et l'accessibilité au vent

Les coûts d'accès au site, ceux de la planification et tous les autres coûts fixes restent les mêmes ou évoluent de façon non proportionnelle avec la puissance de l'appareil. Comme le vent est fortement freiné par les obstacles au sol, sa vitesse augmente avec la hauteur. L'énergie variant avec le cube de la vitesse du vent, la production d'électricité sera bien plus importante à une vitesse plus élevée. De plus, la production d'électricité augmente de façon quadratique avec le rayon du rotor et donc chaque mètre de plus dans la taille des pâles permettra à la production électrique d'augmenter de façon considérable.

Autrefois, il était rare de voir des éoliennes à l'intérieur des terres. La plupart se concentraient sur les côtes, dans des régions fortement ventées comme la Hollande, le Danemark ou la Californie. Actuellement, l'utilisation des éoliennes à l'intérieur des terres est devenue chose courante, bien que la vitesse du vent soit normalement moins élevée qu'en bordure de mer, notamment à cause des différents obstacles agissant comme perturbateurs et ralentisseurs. Mais comme les éoliennes, avec des mâts entre 70 m et 140 m de haut, dépassent aujourd'hui facilement la taille des obstacles comme les arbres ou les habitations isolées, les conditions pour une utilisation rentable de l'énergie du vent sont améliorées. Un seul appareil de 4.5 MW de la nouvelle génération, comme le nouveau prototype de la société Enercon construit à Magdeburg en Allemagne, peut fournir aujourd'hui assez d'électricité pour quasiment 15'000 personnes². La hauteur au niveau de sa nacelle est de 124 m et le diamètre de son rotor de 112 m, donnant une taille totale de 180 m.

- L'esthétique

Les éoliennes de grande puissance, de l'ordre du mégawatt (MW), tournent avec une vitesse inférieure à celle de la fréquence cardiaque normale et dégagent ainsi une impression de quiétude, à l'inverse des petits appareils qui donnent plutôt une impression stressante. A cause de la taille de leur rotor relativement grande, des distances plus grandes sont



Figure 8 : Parc éolien en Andalousie, Espagne, présentant un paysage chargé dû au nombre d'éoliennes de petite taille et à la proximité de l'une par rapport à l'autre.

² D'après un communiqué de presse d'Enercon GmbH du 25.07.2002 « Weltgrösste Windenergieanlage wird aufgebaut ».

nécessaires entre deux appareils afin de conserver un vent efficace. Il en résulte des paysages moins chargés (Figure 8) et plus en harmonie avec la nature alentour. Les nouveaux appareils apparaissent ainsi majestueux et élégants, avec un rotor à trois pâles présentant un aspect plus équilibré que les anciens à deux pâles, des couleurs neutres et mates et un design étudié pour une intégration paysagère optimale.

▪ L'écobilan

Avec une production énergétique dépassant l'énergie nécessaire à sa construction et son installation en seulement 4 à 6 mois, les performances écologiques des éoliennes sont remarquables et meilleures que celles de toutes les autres formes de production d'énergie.



Figure 9 : Installation d'éoliennes de grande puissance (MW) à proximité d'éoliennes de puissance moyenne.

Vu les avantages qu'offrent les éoliennes actuelles, quelques pays ont commencé à remplacer leurs petites éoliennes placées sur des sites bien exposés par d'autres plus modernes et de plus grandes puissances (Figure 9).

Bien que des prévisions soient effectuées régulièrement sur le développement prévu de la technologie éolienne, l'accroissement spectaculaire de la puissance des éoliennes a dépassé les prévisions les plus optimistes. Il y a aujourd'hui plus d'offres pour des appareils de puissance supérieure à 1 MW que pour des éoliennes entre 450 kW et 750 kW (Figure 10 et Figure 11).

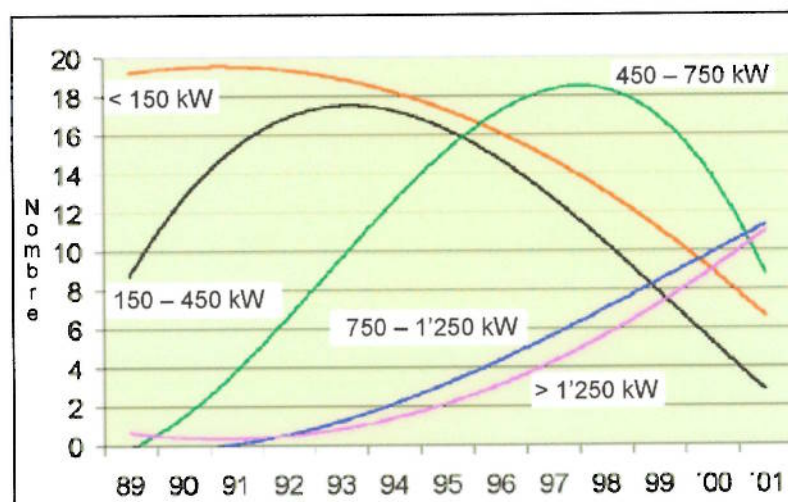


Figure 10 : Nombre d'éoliennes différentes disponibles sur le marché en Allemagne suivant les années. © BWE.

La taille des éoliennes utilisables à l'intérieur des terres est toutefois limitée par le transport des éléments constitutifs de l'appareil, du site de production vers le lieu d'implantation. En effet, la taille des pâles et la masse de la nacelle deviennent telles que l'accès au site éolien est de plus en plus critique. Pour une éolienne de 4.5 MW, les pâles construites d'une pièce font 55 m de long et la nacelle contenant la génératrice pèse jusqu'à 400 tonnes.

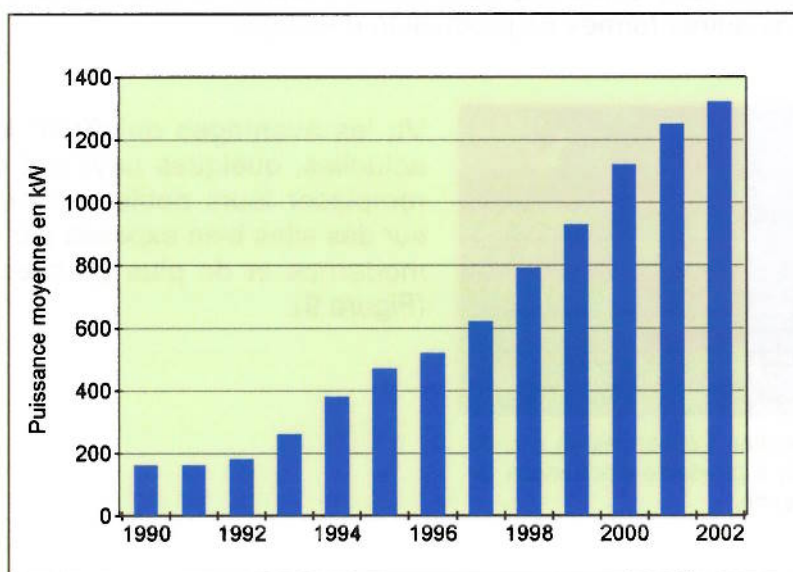


Figure 11 : Puissances moyennes des éoliennes installées en Allemagne. Pour la première fois en 2000, la puissance moyenne des appareils installés a dépassé le MW, pour atteindre, en 2002, 1.3 MW.

« On agit souvent de façon hâtive. Nous sommes en Suisse et il faut savoir être patient. Nous avons cependant l'impression que le développement de l'énergie éolienne se fait d'une façon précipitée. Ralentissez votre cadence ! »

Richard Patthey, Fondation suisse pour la protection du paysage. Energies Renouvelables, 01.2002.

CONTEXTE POLITIQUE ET ECONOMIQUE EN SUISSE ET EN EUROPE

Un regard au-delà des frontières est bien utile et instructif pour apprécier le développement de l'énergie éolienne en Suisse.

Si on compare la Suisse avec les pays voisins, on note qu'elle est le seul pays dans lequel l'énergie éolienne ne joue encore qu'un rôle négligeable. Les pays frontaliers peuvent être classés dans deux groupes distincts: les pays possédant une industrie éolienne fortement développée – par exemple l'Allemagne – et les pays dont l'industrie n'est entrée que récemment en phase de développement accéléré, comme la France.

COMPARAISON SUISSE – PAYS FRONTALIERS

Pays	Suisse	France	Autriche	Allemagne	Italie	U.E.
Puissance totale 2000 ³	3	79	78	6'100	425	13'000
Puissance totale 2001	4.5	94	97	8'750	700	17'500
Puissance totale 2002 (estimation)	5.5	160	120	11'750	?	24'000
W / hab. en 2001	0.6	1.6	12.0	106.7	12.2	46.6

Tableau 1 : Comparaison de la puissance éolienne (en MW) installée en Suisse et dans les pays frontaliers.

³ A titre de comparaison, la centrale nucléaire de Mühleberg à une puissance nominale de 372 MW, celles de Beznau de 2 x 380 MW, celle de Gösgen de 1'020 MW et celle de Leibstadt de 1'085 MW, soit au total 3'240 MW installés en Suisse.

ANALYSE DE LA SITUATION ACTUELLE

Situation en Suisse

Il n'existe actuellement en Suisse qu'un seul parc éolien, situé sur le Mont-Crosin (BE), et ayant une puissance nominale de 4.2 MW, valeur correspondant à 80% de la capacité nationale en énergie éolienne installée. L'énergie éolienne couvre, en 2002, moins de 0.001% de la consommation d'électricité totale de la Suisse. La puissance totale installée, soit 5.3 MW, représente une quantité extrêmement faible si on la compare à celle existante en Allemagne ou dans d'autres pays frontaliers. En Allemagne, la capacité éolienne installée s'élève à plus de 8 MW par jour, soit plus que la capacité totale présente en Suisse aujourd'hui.

Les prévisions de production pour la Suisse, évaluées entre 50 et 100 GWh par an à l'aune de 2010 et correspondant à environ 30 – 60 MW de capacité à installer jusqu'à cette date, correspondent donc à la puissance mise en service en une seule semaine en Allemagne.

Situation en France

La France a eu pendant des décennies une politique orientée vers l'utilisation intensive de l'énergie nucléaire, secteur qui représente aujourd'hui 78% de sa production totale d'électricité. Dans ce contexte, les éoliennes ont joué un rôle plutôt négligeable, avec une capacité relativement faible de 97 MW installés jusqu'en l'an 2000. L'arrêté du 8 juin 2001⁴ représente un tournant dans la politique française de production d'énergie. Cet arrêté favorise fortement le développement de l'énergie éolienne en fixant un prix minimum d'achat garanti, pendant une période de 30 ans. La France s'oriente donc avec cette nouvelle loi dans la direction prise par des pays comme le Danemark, l'Allemagne ou encore l'Espagne, dans lesquels l'énergie éolienne s'est développée de façon industrielle, grâce à des lois analogues.

Le potentiel en vent de la France est parmi l'un des plus grands d'Europe, avec des conditions d'exposition excellentes. Le but du gouvernement français est d'installer, d'ici 2010, plus de 7'000 éoliennes représentant 10'000 – 14'000 MW, pour un investissement total d'environ 10 milliards d'euro.

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en France devrait donc passer de 12,1% actuellement à 20% jusqu'en 2010.

⁴ « Arrêté du 8 juin 2001 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent, telles que visées à l'article 2-2° du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000 ».

Situation en Autriche

De par sa situation géographique, l'Autriche est un pays comparable à la Suisse. Sur une échelle mondiale, l'Autriche figure parmi les pays les plus avancés en ce qui concerne l'utilisation des énergies renouvelables. Elle a, par exemple, la densité la plus élevée de collecteurs solaires thermiques de l'Union européenne et – si le développement actuel continue – ces collecteurs fourniront déjà 4 % de la consommation nationale d'eau chaude (chauffage, etc.) en 2010. Le système de prix garantis pour le courant éolien est aujourd'hui du ressort de chaque Land, mais cette situation va changer début 2003 avec un tarif unique pour tout le pays. L'objectif officiel est d'augmenter la proportion d'électricité produite à partir de sources renouvelables de 70 à 78 % jusqu'au 2010. Cet objectif implique une forte progression de l'énergie éolienne en Autriche. Avec 97 MW déjà installés fin 2001, l'Autriche dépasse déjà l'objectif de la Suisse pour 2010.



Figure 12 : Construction du parc éolien le plus élevé d'Europe, dans le massif du Niedere Tauern en Autriche. Etat du parc le 09.09.02. Onze Vestas V-66 de 1.75 MW seront installées à 1900 m d'altitude. © Tauernwind.

Situation en Allemagne

En 1985, la première éolienne privée, d'une puissance nominale de 20 kW, est installée. En juillet 2002, soit seulement 17 ans plus tard, l'énergie éolienne est devenue une industrie comptant plus de 35'000 collaborateurs et représentant plus de 5 milliards de francs de chiffre d'affaires.

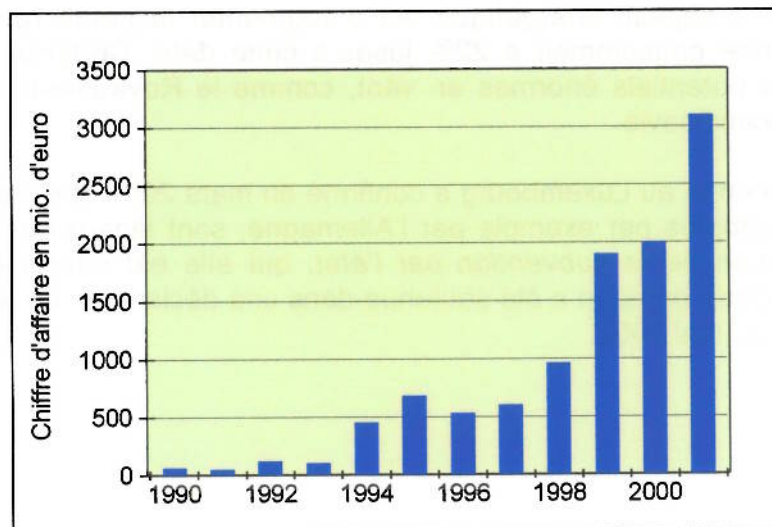


Figure 13: Chiffre d'affaire annuel du secteur éolien en Allemagne.

Quelles sont les raisons de cette incroyable croissance ?

En 1995, le Parlement allemand vote une loi garantissant l'achat du courant éolien par les producteurs d'électricité à un prix fixe. En 1998, le Gouvernement décide d'augmenter ce prix garanti à DM 0.176, soit environ Fr. 0.14. Cette loi a permis une croissance extraordinaire de l'énergie éolienne et le nombre d'appareils installés a régulièrement dépassé les prévisions les plus optimistes. En juillet 2002, la capacité totale installée a atteint les 10'000 MW couvrant ainsi 3,75 % de la consommation en électricité du pays. Pour l'année 2002, 2'000 – 2'500 éoliennes, soit 3'000 MW, seront installées.

Ce remarquable développement a lieu dans un pays n'offrant qu'un environnement naturel moyen pour l'exploitation du vent. L'Allemagne possède l'économie la plus importante d'Europe, où la consommation d'électricité et la densité de population sont élevées. Malgré ces conditions difficiles, l'énergie éolienne a pu se développer et va remplacer en grande partie les méthodes traditionnelles de production d'électricité. Jusqu'en 2030, toutes les centrales nucléaires, qui fournissent actuellement 40% de l'électricité, pourront être remplacées par des parcs éoliens. Des demandes officielles ont déjà été déposées pour la construction de centrales offshore dans la mer du Nord d'une capacité cumulée de 60'000 MW.

Situation en Italie

En Italie, l'énergie éolienne a connu une forte croissance (+ 65 %) entre 2000 et 2001. Avec un total de 700 MW en 2001, le pays occupe déjà la sixième place au niveau mondiale dans la production d'électricité à partir de cette source renouvelable.

Situation en Europe

L'Union européenne favorise l'énergie éolienne et prévoit l'installation de 85'000 MW jusqu'en 2010. L'objectif énergétique est d'augmenter la partie renouvelable de l'énergie primaire consommée à 22% jusqu'à cette date. Certains pays de l'UE possèdent des potentiels énormes en vent, comme le Royaume-Uni, l'Irlande, la France ou la Scandinavie.

La Cour européenne au Luxembourg a confirmé en mars 2001 que les systèmes de prix garantis, adoptés par exemple par l'Allemagne, sont légaux car n'entrant pas dans la définition de la *subvention par l'état*, qui elle est interdite par les lois européennes. Cette décision a été soutenue dans une déclaration de la Commission européenne le 22 mai 2002.

LE FUTUR DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE EN SUISSE

L'objectif politique pour la Suisse est de produire entre 50 et 100 GWh d'énergie éolienne par an à partir de 2010, ce qui correspond à 10 – 20 parcs éoliens de la taille de celui de Juvent SA au Mont-Crosin. D'autres objectifs avaient été prédis pour les années précédentes, mais n'ont pas été atteints.

Commentaires sur les objectifs pour la Suisse

- Dans des pays ou régions avec une structure géographique et une taille comparable, comme l'Autriche ou le Bade-Wurtemberg, cette quantité a déjà été atteinte ou dépassée fin 2001.
- La capacité à installer en Suisse pendant les huit prochaines années correspond à ce qui est installé en Allemagne en sept jours seulement.
- La production d'énergie par le vent ne va jouer qu'un rôle négligeable en Suisse, représentant moins de 0.1% de la consommation totale d'électricité.

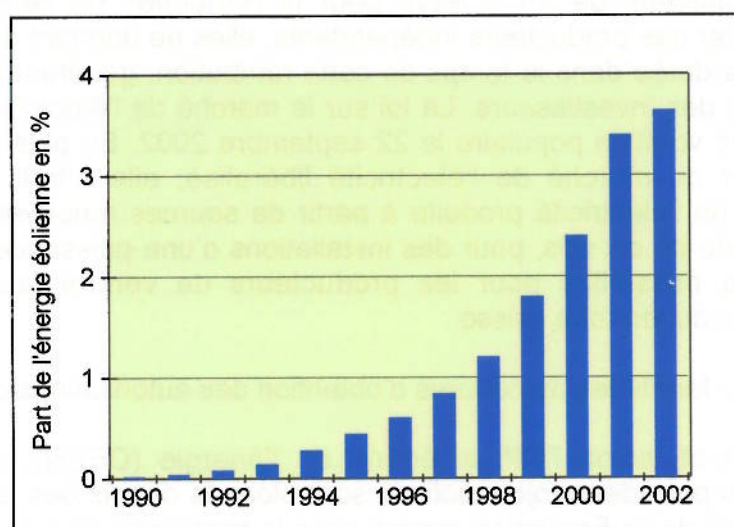


Figure 14 : Part de la consommation d'électricité d'origine éolienne en Allemagne (en %) par rapport à la consommation totale. Pour l'année 2002, la valeur est donnée pour les premiers six mois.

Dans la perspective du Sommet de Johannesburg, le Conseil fédéral a adopté au cours du printemps 2002 la « *Stratégie 2002 pour le développement durable* ». Cette stratégie s'appuie sur les dispositions de la nouvelle Constitution fédérale et vise à intégrer les principes du développement durable à toutes les politiques sectorielles de la Confédération. Elle présente les grands axes de la politique du développement durable du Conseil fédéral ces prochaines années. Elle définit, outre les lignes directrices de cette politique, 22 mesures concrètes dans dix champs d'action différents. Le domaine d'intervention n° 6, *Environnement et ressources naturelles*, qui, sous le titre *Action 9*, traite de la politique énergétique et climatique. Cette action souligne qu'à long terme, « la Suisse a besoin d'un approvisionnement en énergie qui permette un rendement énergétique supérieur et renforce l'utilisation d'énergies renouvelable. Le programme SuisseEnergie et les instruments de la loi sur l'énergie

et de celle sur le CO₂ constituent les bases de développement de la politique énergétique et climatique actuelle en faveur d'un approvisionnement énergétique à long terme et respectueux du climat. [...]. Le scénario de la société à 2000 watts [...] exigerait une couverture de la consommation énergétique de 500 watts par personne par des énergies fossiles et de 1500 watts par des énergies renouvelables. »

Bases légales et économiques pour le succès de l'énergie éolienne

La situation chez nos voisins montre que deux facteurs sont primordiaux pour assurer le développement de l'énergie éolienne :

1. Une loi garantissant un prix d'achats fixe du kWh d'énergie éolienne par les producteurs d'électricité (monopolistes).

La loi en vigueur au niveau suisse oblige les producteurs à acheter le courant vert (LEne Art. 7 et OEne Art. 4). Ces dispositions ont cependant été critiquées, car si les recommandations d'application définissent un prix annuel moyen minimum de 15 ct./kWh pour la rétribution de l'énergie éolienne produite par des producteurs indépendants, elles ne donnent aucune garantie quant à la durée dans le temps de cette rétribution, générant une incertitude au niveau des investisseurs. La loi sur le marché de l'électricité (LME) a été refusée en votation populaire le 22 septembre 2002. En plus de son rôle de régulateur du marché de l'électricité libéralisé, elle offrait la gratuité du transport de l'électricité produite à partir de sources renouvelables pendant une période de dix ans, pour des installations d'une puissance inférieure à 1 MW et la possibilité pour les producteurs de vendre leur énergie sur l'ensemble du territoire suisse.

2. Une loi qui facilite les procédures d'obtention des autorisations de construction

Actuellement, selon l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), la plupart des demandes pour des projets éoliens sont bloqués depuis des années par des oppositions de la Fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage (FSPAP). Chez aucun de nos voisins une association comme la FSPAP n'a pris autant d'importance et n'a eu autant d'influence sur le développement de l'énergie éolienne qu'en Suisse.

Comme la volonté politique a été exprimée par le Parlement jurassien en adoptant, dans le cadre de la révision du plan directeur cantonal, un arrêté dont un des objectifs entend *"encourager la diversification énergétique en privilégiant les agents indigènes et renouvelables"*, le canton pourrait éventuellement soutenir l'énergie éolienne en mettant en place des instruments facilitant son implantation. Des mesures financières et fiscales, comme celles utilisées chez nos voisins, pourraient être envisagées au niveau cantonal, garantissant un prix fixe d'achat de l'électricité produite à partir des éoliennes sur la base d'un impôt énergétique ou à travers une société de distribution. Des mesures juridiques et techniques, comme un droit prioritaire à l'implantation d'éolienne sur le territoire cantonal peuvent aussi être envisagées. La légalité, l'impact et l'opportunité de ces différentes mesures devraient être étudiés en détail.

Il va de soi que les éoliennes constituent toujours des éléments très visibles dans le paysage. Sinon elles ne seraient pas bien situées d'un point de vue météorologique.
www.windpower.dk

CONTEXTE DU CANTON DU JURA

LE VENT

Généralités

A des altitudes élevées, environ 1000 m au-dessus du sol, l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. Par contre, dans les couches d'air plus basses, la friction contre la surface du terrain influe beaucoup sur la vitesse du vent. Dans l'industrie éolienne, on distingue entre la rugosité du terrain et l'influence exercée par les obstacles avoisinants et les contours du paysage. Tous deux ont une influence sur la production d'électricité des éoliennes.

La rugosité

En règle générale, une rugosité forte freine considérablement la vitesse du vent. Ainsi, les forêts et les grandes villes freinent beaucoup le vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'a que peu d'influence. La surface de la mer a une rugosité encore plus faible que les pistes d'atterrissage, ce qui fait qu'elle perturbe encore moins l'écoulement de l'air, alors que l'herbe longue, les buissons et les arbrisseaux freinent considérablement le vent.

Classes de rugosité

Dans l'industrie éolienne, on se réfère en général à la classe de rugosité lorsque l'on évalue le potentiel éolien d'un endroit donné. Ainsi, les paysages à rugosité forte – avec beaucoup d'arbres ou d'immeubles – sont rattachés à la classe de rugosité 3 ou 4 tandis que la surface de la mer est classée 0. Les pistes d'atterrissage en béton appartiennent à la classe de rugosité 0,5. Le Tableau 2 donne les définitions précises des classes de rugosité.

Classe de rugosité	Description du terrain
0	Surface d'eau.
0.5	Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, p.ex. une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée.
1	Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies.
1.5	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1.250 m les unes des autres.
2	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres.
2.5	Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres.
3	Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté.
3.5	Grandes villes avec de hauts immeubles.
4	Très grandes villes avec de hauts immeubles et des grattes ciel.

Tableau 2 : Table des classes de rugosité. Définitions selon l'Atlas européen, WasP.

Le cisaillement du vent

Le graphe de la Figure 15 a été produit en utilisant le programme de calcul de la vitesse du vent de Windpower (www.windpower.dk). Il montre les variations de la vitesse du vent dans un paysage appartenant à la classe de rugosité 3 (terre agricole accidentée avec de hautes haies vives et des forêts), si nous supposons que la vitesse du vent est égale à 5.0 m/s à une hauteur de 50 mètres au-dessus du sol.

On parle normalement du cisaillement du vent pour désigner la variation de la vitesse en fonction de la distance à la surface de la terre. Le cisaillement du vent est également pris en considération lors de la construction d'une éolienne. S'il est question d'une éolienne dont la hauteur de moyeu est de 40 m et le diamètre de rotor est de 40 m, la vitesse du vent sera égale à 5.19 m/s au point le plus haut de la surface balayée par le rotor, contre 4.05 m/s au point le plus bas. Cela signifie que les forces travaillant sur les pâles sont bien plus fortes lorsque celles-ci se trouvent dans leur position la plus haute que lorsqu'elles se trouvent dans leur position la plus basse.

Habituellement, la détermination de la courbe de cisaillement du vent (variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur) s'effectue en prenant les vitesses moyennes du vent à deux ou trois hauteurs différentes.

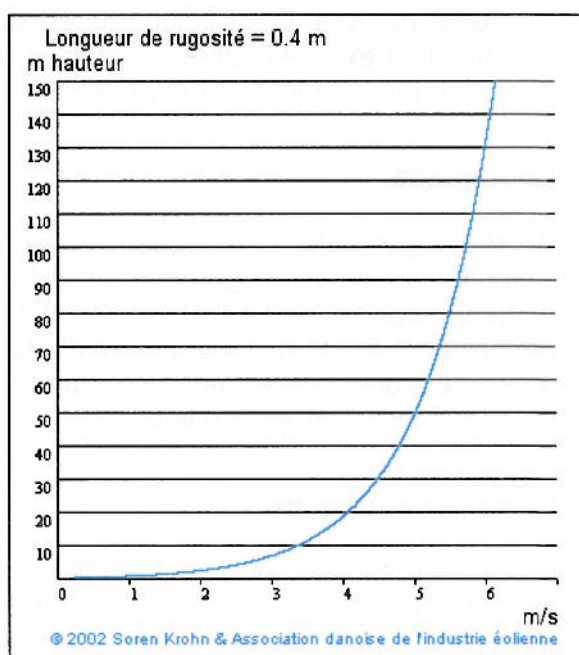


Figure 15 : Courbe de cisaillement pour une vitesse de vent de 5.0 m/s à 50 m au-dessus du sol et avec un facteur de rugosité de 3.

Cette courbe ainsi déterminée permet de calculer la vitesse à la hauteur désirée. La vitesse du vent en fonction de la hauteur est donnée par l'équation suivante :

$$V_h = V_r \cdot \left(\frac{h}{h_r} \right)^k$$

V_h , est la vitesse du vent moyen à une hauteur h au-dessus du sol, V_r la vitesse moyenne à la hauteur de référence h_r au-dessus du sol et k est l'exposant moyen du gradient vertical.

Le vent dans le Canton du Jura

En principe, les vents puissants ne se trouvent pas qu'au large des côtes, mais aussi à l'intérieur des terres. Cependant, contrairement à la situation rencontrée en pleine mer, le vent soufflant dans nos régions est freiné par toutes sortes d'obstacles, comme les montagnes, les collines, les maisons, les forêts, etc.

Le programme WINFO, développé par l'entreprise Meteotest et mis à disposition par l'OFEN pour calculer la vitesse du vent (voir *Démarche*), indique effectivement des vitesses de vent très élevées sur les points culminants de la chaîne du Jura, comme le sommet du Chasseral. Ce modèle prévoit un changement de vitesse en fonction de l'altitude du terrain, avec un gradient de 0.37 m/s pour 100 m de dénivelé. Le modèle prédit donc pour les basses altitudes des vents faibles.

La vitesse de vent maximale pour le Canton du Jura, calculée à l'aide de ce programme à 50 m au-dessus du sol, est de 5.3 m/s. Les altitudes relativement basses rencontrées dans le canton expliquent cette vitesse peu élevée. Des valeurs de vitesse de vent si faibles remettent en question l'opportunité d'une production d'énergie éolienne dans le Canton du Jura, la vitesse minimale requise pour une exploitation rentable du vent étant de 5.5 m/s.

Nous allons démontrer ci-après les limites de ce programme pour le Canton du Jura et essayer de déterminer le potentiel réel en vent pour la région, par comparaison avec des données connues pour des sites présentant une topographie équivalente.

Le programme WINFO prévoit pour le plateau de Pleigne, situé à 820 m d'altitude, des vents de seulement 4.3 m/s à 50 m au-dessus du sol, malgré une exposition excellente. Pour les hauteurs du Clos-du-Doubs, qui se situent à environ 900 m d'altitude, il prévoit une vitesse moyenne de 4.6 m/s à 50 m également.

En analysant ce programme de prévisions, on note que :

- Il y a une erreur de ± 1 m/s sur les vitesses de vent, car elles sont calculées et non mesurées. Cette erreur est énorme pour les prévisions de production de l'énergie éolienne, car la quantité de courant fournit dépend du cube de la vitesse du vent. Par exemple, le courant produit avec une vitesse de vent de 4.5 m/s est inférieur de 54% à celui obtenu pour une vitesse de 5.5 m/s, alors qu'il serait plus élevé de 165% avec une vitesse de 6.5 m/s.
- Le programme défavorise surtout les sites situés à moins de 1000 m d'altitude. Ceux-ci ayant une vitesse de vent déjà plus faible que les sites de haute altitude, une sous-estimation de cette dernière a un impact bien plus important sur leur potentiel de faisabilité. Il ne tient de plus pas compte de leur dégagement dans la direction principale du vent.
- Les éoliennes modernes et destinées à une installation à l'intérieur des terres mesurent entre 70 m et 140 m de haut, et non plus 50 m comme autrefois. Comme l'influence de la rugosité du terrain est encore importante à 50 m de haut pour le Jura, mais qu'elle diminue rapidement au-delà, les vitesses de vent sont nettement plus élevées entre 70 m et 120 m au-dessus du sol.

Analyse de l'énergie éolienne dans le Jura et la Forêt-noire

Le Bade-Wurtemberg et plus particulièrement la Forêt-noire et les montagnes du Schwäbischer Jura, régions situées au nord-est du Canton du Jura, présente une situation géographique comparable à celle étudiée.

Le Bade-Wurtemberg a été un des Länder le plus prudent en Allemagne à l'encontre des installations éoliennes, pour des raisons politiques et géographiques. Malgré cette attitude attentiste, les installations se multiplient et la capacité totale installée actuellement a atteint 158 MW. 66% de cette capacité a été posée depuis début 2001, correspondant à 104 MW en 21 mois. La plupart des sites sont situés à des altitudes relativement basses, comprises entre 600 m et 900 m.

Le parc éolien de Mahlberg, composé de deux Nordex de 2.5 MW chacune, a été construit en 2001 (Figure 16). Trois autres Nordex de 1.3 MW se trouvent à une distance de 3 km environ. Les deux Nordex de 2.5 MW ont leurs nacelles situées à 80 m au-dessus du sol.



Figure 16 : Région de Mahlberg, dans la Forêt Noire. Eoliennes de 2.5 MW et d'une hauteur totale de 120 m.



Figure 17 : Eolienne dans le Jura allemand, près de Wiesensteig. L'éolienne a une hauteur totale de 94 m.

Le parc éolien de Wiesensteig, près de l'autoroute A8 entre Stuttgart et Ulm, développe une puissance totale de 4.5 MW (Figure 17). En décembre 1999, trois éoliennes Vestas de 750 kW ont été installées sur une colline située à 810 m d'altitude, suivies par trois autres en mai 2000. Leurs nacelles sont à 70 m de haut, la vitesse du vent à cette hauteur étant de 5.8 m/s. La production pour l'année 2000 a été environ 1.2 fois plus élevée par m^2 de surface balayée par le rotor que celle des éoliennes du Mont-Crosin.

Atlas de l'énergie solaire et du vent du Bade-Wurtemberg

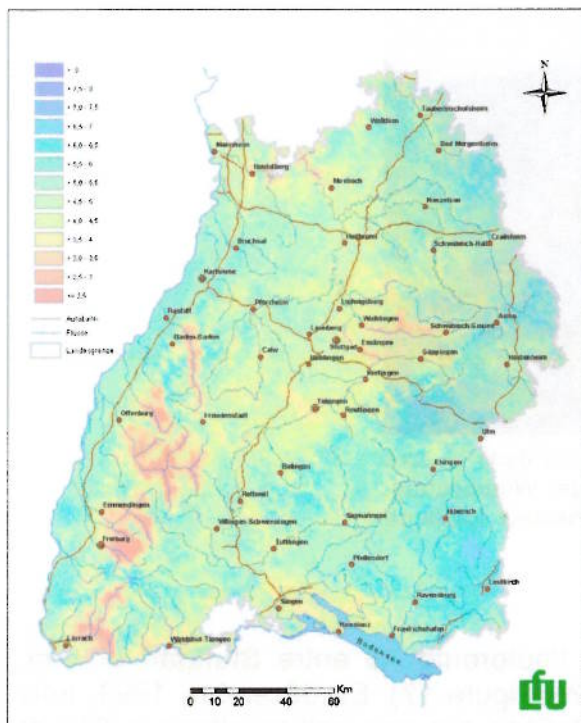


Figure 18 : Vitesse moyenne du vent à une hauteur de 50 m.

L'atlas de l'énergie solaire et du vent (Solar- und Windenergieatlas) du Bade-Wurtemberg, datant de 1995, a été révisé récemment afin de tenir compte de la taille de plus en plus élevée des nouvelles éoliennes.

Les données météorologiques et les procédés de calcul ont ainsi été adaptés et appliqués pour produire cet atlas.

La hauteur d'une éolienne est un facteur décisif, parce que la vitesse de vent augmente avec la distance entre le sol et le rotor. Actuellement les appareils avec des mâts de 80 m à 100 m sont courants. C'est pour cette raison que dans cette édition de l'atlas, les vitesses de vent ont été reportées pour des hauteurs de 50 m, 80 m et 130 m. Ces hauteurs sont prises à partir du niveau d'exclusion du vent. Ce niveau d'exclusion se trouve, par exemple dans

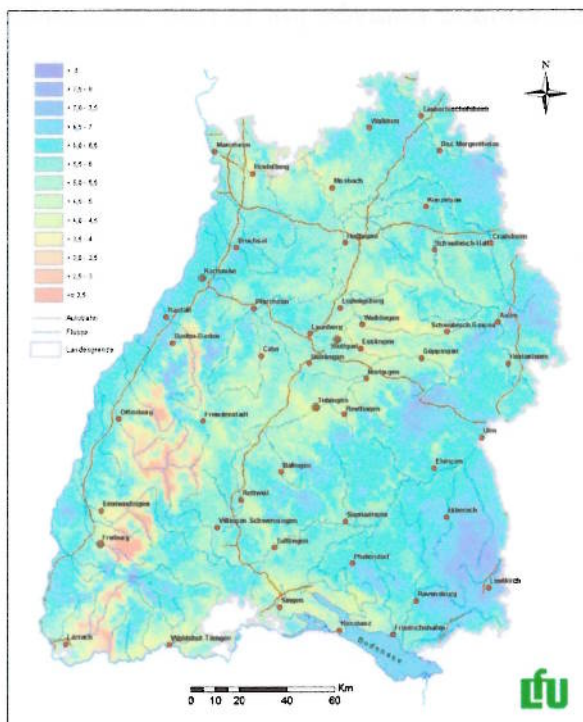


Figure 19 : Vitesse moyenne du vent à une hauteur de 80 m.

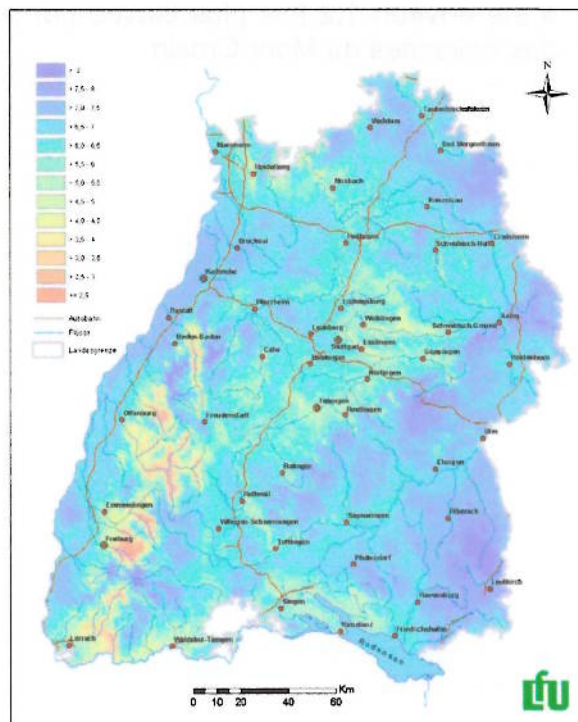


Figure 20 : Vitesse moyenne du vent à une hauteur de 130 m.

une forêt, à la hauteur moyenne de la cime des arbres ou, dans une ville, à la hauteur des toitures.

Contrairement au modèle choisi pour WINFO, celui élaboré pour le présent atlas donne des vitesses de vent très élevées, parfois trop si on les compare avec les mesures.

Les vitesses de vent s'homogénéisent avec l'augmentation de la hauteur et les cartes ci-dessus (Figures 18, 19 et 20) montrent que les zones situées proche du sol (50 m) subissent un fort cisaillement, majoritairement dû à la structure du paysage et aux obstacles, qui s'estompe lorsque l'on passe à 80 m, puis à 130 m.

Analyse du parc éolien du Mont-Crosin Ouest

Le parc éolien de Juvent SA sur le Mont-Crosin peut servir de modèle pour le Canton du Jura parce qu'il se trouve à faible distance des Franches-Montagnes. La planification future des parcs éoliens dans le Canton du Jura peut profiter de l'analyse de ce site et de l'expérience gagnée lors de son exploitation.

Le parc éolien du Mont-Crosin Ouest est situé à 1'240 m d'altitude. Les quatre appareils (trois Vestas V-44 de 600 kW et une Vestas V-47 de 660 kW) ont produit, en l'an 2000, 2'795 MWh d'électricité, ce qui correspondait à 460 kWh/m². La vitesse du vent sur le site, selon WINFO, est de 5.5 m/s à 50 m.

Le site du Mont-Crosin est plus élevé que tous les sites potentiels du Canton du Jura, qui eux se trouvent à une altitude comprise entre 800 m et 1170 m. Ils sont donc potentiellement moins venteux que ce dernier.

La taille des mâts utilisés, soit 45 mètres, est la longueur minimale utilisée pour des éoliennes d'une puissance de 600 – 660 kW. Un appareil comparable à ceux installés sur le Mont-Crosin, par exemple l'Enercon E-40 de 600 kW est vendu avec des mâts de 45 m, 49 m, 57 m, 64 m, ou 77 m. Les mâts de 64 m et de 77 m ont été spécialement développés pour des sites situés loin des côtes, à l'intérieur des terres. Les mâts de 45 m ou 49 m sont normalement utilisés pour des sites avec vent fort, sur un terrain très plat et sans obstacles importants. Cette stratégie, consistant à mettre des mâts de taille minimale pour répondre aux demandes d'intégration paysagère, a été poursuivie par la société Juvent SA avec l'installation (Mont-Crosin Est) de deux nouveaux appareils de 850 kW chacun (Vestas V-52). La hauteur des mâts de ces appareils est de 49 m seulement. Les longueurs normalement utilisées pour ce type d'éoliennes sont de 65 m, 74 m, ou 86 m.



Figure 21 : Photo-montage montrant côte-à-côte deux appareils de 600 kW : une Enercon E-40 (à gauche) et une Vesta V-47 du site de Mont-Crosin.

En utilisant le programme de calcul de la vitesse de vent sur le site officiel de l'industrie éolienne danoise (www.windpower.dk), on peut calculer la vitesse du vent en fonction de la hauteur de la nacelle. Avec une vitesse de 5.4 m/s à 45 m de haut, on calcule, pour une rugosité de 2, une vitesse de vent de 5.92 m/s à 80 m et de 6.11 m/s à 100 m. Une rugosité de 3 donnerait des vitesses de 6.04 m/s à 80 m et de 6.29 m/s à 100 m de haut. Ces vitesses sont excellentes pour la production d'énergie éolienne.

Un effort particulier a été consenti pour intégrer le mieux possible dans le paysage les quatre éoliennes du site de Mont-Crosin Ouest, en choisissant une hauteur de mât relativement petite. Elles sont situées sur un petit plateau entouré d'arbres et de collines plus élevées, comme le Mont-Soleil vers le sud-ouest, dans la direction principale du vent. Une visite sur le site nous a montré que, par exemple, l'appareil n°2 est fortement influencé par la présence d'une forêt située à 100 m vers l'ouest (Figure 22).



Figure 22 : A gauche, l'appareil du Mont-Crosin est placé à seulement 100 m d'une forêt située à l'ouest. Il ne tourne pas malgré un vent assez fort, alors que les trois autres appareils tournent déjà ; sa nacelle est dirigée vers le nord. A droite, avec un vent plus fort encore, l'appareil se met à tourner et s'oriente vers l'ouest.

Le Mont-Soleil, situé à trois kilomètres de là, fait office d'obstacle important car :

- il est plus élevé de 50 mètres que le site de Mont-Crosin
- une forêt se trouve à proximité, augmentant encore la zone de perturbation du vent
- il est situé dans la direction principale du vent (Figure 23).



Figure 23 : Vue vers le Mont-Soleil, au sud-ouest. Sur la photo, le sommet est caché par des nuages.

Vue panoramique à 360° du Mont-Crosin

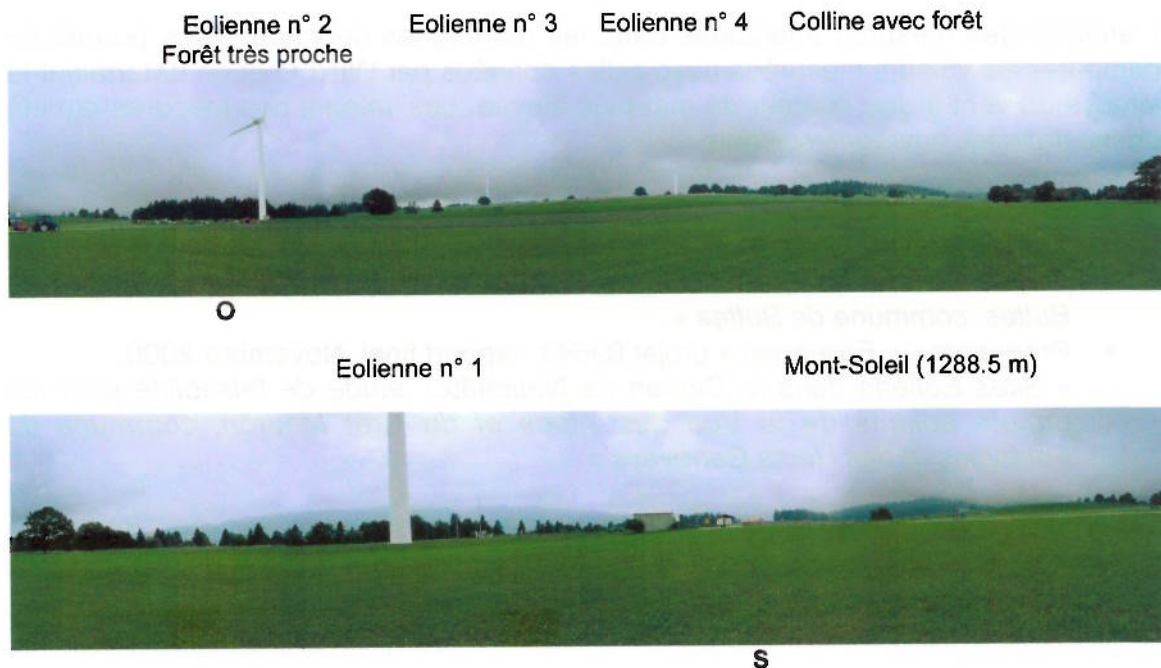


Figure 24 : La vue panoramique du site de Mont-Crosin montre que plusieurs obstacles se trouvent près du site (collines, bois).

Avec un seul appareil de 1'800 kW, avec une nacelle à 100 m au-dessus du sol, on pourrait très probablement produire plus d'électricité sur ce site de Mont-Crosin Ouest qu'avec les quatre appareils existants actuellement d'une puissance nominale totale de 2'460 kW. A elle seule, la vitesse du vent plus élevée à 100 m pourrait donner 42% d'énergie en plus. Si on ajoute 15% supplémentaires à l'énergie totale ainsi obtenue, dus aux progrès techniques des nouvelles éoliennes, on arrive à un gain d'électricité produite encore plus élevé. Donc 1 x 1.8 MW à 100 m produit théoriquement plus d'électricité que quatre appareils d'une puissance totale de 2.46 MW à 45 m. Finalement, l'impact sur le paysage d'un appareil de plus grande taille serait moins important que celui généré par les quatre appareils existants.

Comme il y a sur le site de la place pour quatre appareils de 1.8 MW, on pourrait produire, avec la même emprise au sol, quatre fois plus d'énergie renouvelable qu'actuellement et fournir ainsi l'électricité pour environ 4'000 habitations, soit environ 9'000 personnes.

Si la rugosité du terrain est plus importante, par exemple 3, la vitesse du vent et la production d'énergie seraient plus élevées encore.

Analyse des mesures de vent dans le Jura neuchâtelois

L'analyse des mesures effectuées dans les montagnes neuchâteloises permet de comparer les valeurs mesurées avec celles données par WINFO et de déterminer la vitesse du vent à une hauteur de mât plus élevée. Les valeurs des mesures ont été prises dans les ouvrages suivants :

- Programme « Eoliennes » projet 32907, rapport final, Novembre 2000.
« Sites Eoliens dans le Canton de Neuchâtel, étude de faisabilité pour les projets éoliens du Grand Cœurrie, commune de Rochefort et Montagne de Buttes, commune de Buttes ».
- Programme « Eoliennes » projet 69643, rapport final, Novembre 2000.
« Sites Eoliens dans le Canton de Neuchâtel, étude de faisabilité pour les projets éoliens de la Vue des Alpes et du Crêt Meuron, commune de Fontaines et des Hauts Geneveys »

Les mesures ont été effectuées à 35 m et 50 m du sol pour les sites du Grand Cœurrie, de la Montagne de Buttes et du Crêt Meuron, alors qu'elles ont été prises à 30 m et 40 m pour le site de la Vue des Alpes.

Le Grand Cœurrie

Altitude du site : 1330 m

Vitesse moyenne annuelle du vent à 50 m : 6.9 m/s

Exposant moyen du gradient vertical du vent mesuré *in situ* : 0.19

D'après les auteurs du rapport, cet exposant est élevé pour une colline de ce type et une valeur plus normale de 0.1 est recommandée. La cause probable d'une valeur si élevée est décrite comme étant due à la présence d'arbres autour du site.

Vitesse moyenne annuelle calculée à 60 m avec $k = 0.19$: 7.14 m/s

La Montagne de Buttes

Altitude du site : 1250 m

Vitesse moyenne annuelle du vent à 50 m : 5.82 m/s

Exposant moyen du gradient vertical du vent mesuré *in situ*: 0.2716

De nouveau, cet exposant est jugé élevé pour une colline de ce type et une valeur plus normale de 0.1 est proposée, la cause probable étant toujours la présence d'arbres autour du site.

Vitesse moyenne annuelle calculée à 60 m avec $k = 0.1$: 5.93 m/s

La Vue des Alpes

Altitude du site : 1300 – 1400 m

Vitesse moyenne annuelle corrigée du vent à 40 m : 6.26 m/s

Exposant moyen du gradient vertical du vent mesuré *in situ*: 0.2385

Comme précédemment, cet exposant est jugé élevé pour une colline de ce type et une valeur plus normale de 0.1 – 0.15 est proposée. La cause est la même. Dans le rapport, une valeur de 0.13 a été prise pour les corrélations vers le haut.

Vitesse moyenne annuelle calculée à 60 m avec $k = 0.13$: 6.6 m/s

Le Crêt Meuron

Altitude du site : 1330 m

Vitesse moyenne annuelle du vent à 50 m : 6.16 m/s

Exposant moyen du gradient vertical du vent mesuré *in situ*: 0.31

Cet exposant est élevé pour une colline de ce type. Une valeur plus normale serait de 0.1 et la cause probable est la présence d'arbres autour du site. Pour les corrélations vers le haut de ces données, cette valeur plus conservatrice a été prise.

Vitesse moyenne annuelle calculée à 60 m avec $k = 0.1$: 6.27 m/s

Discussion

La différence de vitesse du vent entre 30 m ou 35 m et 40 m ou 50 m pour chacun des quatre sites examinés ci-dessus est remarquable et montre que le vent subit un fort cisaillement, d'où les exposants k élevés.

Les facteurs de rugosité calculés, qui se situent autour de 3 pour tous les sites, montrent que le vent est fortement influencé par les alentours. La présence d'arbres doit jouer un rôle important.

Pour calculer les vitesses de vent à une hauteur de 60 m, les auteurs ont changé la rugosité du terrain pour le site de

- | | |
|--------------------------|------------|
| 1. La Montagne de Buttes | de 3 à 0.5 |
| 2. La Grande Cœurrie | de 3 à 3 |
| 3. Le Crêt Meuron | de 3 à 0.5 |
| 4. La Vue des Alpes | de 3 à 1 |

La valeur de 3 pour le Grand Cœurrie est apparemment une erreur dans l'étude. D'une manière générale, les auteurs ont eu l'intention de baisser la rugosité de 3 à 1 pour le site de la Vue des Alpes et de 3 à 0.5 pour les autres sites. Un facteur de rugosité de 0.5 correspond à un terrain complètement dégagé avec une surface lisse (Tableau 2).

Comparaison des données de WINFO avec les mesures pour ces sites

Vitesse du vent à la position du mât de mesure, soit à une hauteur de 50 m :

Lieux	Vitesses moyennes du vent mesurées	Vitesses moyennes du vent selon WINFO
Crêt Meuron	6.16 m/s	5.9 m/s
Vue des Alpes	6.26 m/s	6.0 m/s
Grand Cœur	6.90 m/s	6.5 m/s
Montagne de Buttes	5.82m/s	5.8 m/s

- Les valeurs de WINFO sont valables pour une hauteur de 50 m dans un terrain ouvert, sans végétation ni constructions.
- Selon Meteotest, les valeurs sont entachées d'une erreur de ± 1 m/s.

On constate que

- La présence d'arbres sur les sites, entraînant une différence importante de la vitesse du vent entre 35 m et 50 m, devrait donner des valeurs mesurées plus basses que les valeurs prévues par le programme WINFO.
- Au contraire, toutes les valeurs mesurées sont plus élevées que les valeurs calculées par WINFO. La différence maximale est, en termes d'énergie du vent, de 20 %.

Conclusions

L'analyse des mesures du vent, à une hauteur comprise entre 30 et 50 m sur les quatre sites du jura neuchâtelois, montre que

1. Sur un terrain structuré comme la chaîne du Jura, recouvert partiellement d'arbres et de bosquets, le vent subit un fort cisaillement, même dans les endroits bien exposés.
2. Comme le cisaillement est important, la vitesse du vent dépend fortement de la hauteur et à 100 m au-dessus du sol les vents sont de bonne qualité, même pour le site de la Montagne de Buttes.

Avec les corrections introduites dans les rapports par les auteurs, ramenant les facteurs de rugosité de 3 à 1 ou même 0.5, la hauteur n'a plus que très peu d'influence sur la vitesse du vent car l'effet du cisaillement est minimisé.

Un terrain d'une rugosité de 3 nécessite normalement la construction d'éoliennes avec des mâts plus élevés que 50 ou 60 m, car l'énergie du vent augmente fortement

avec la hauteur (cisaillement important) et donc la quantité d'électricité produite pourra être nettement supérieure.

Il n'existe actuellement pas de mesures pour la vitesse du vent à des hauteurs comprises entre 50 m et 130 m pour la chaîne du Jura, sauf une série de mesures Sodar

(mesures par radar) réalisées par la société Juvent SA sur le Mont-Crosin durant l'été 2002. Malheureusement les résultats obtenus n'ont pas été mis à disposition par Juvent SA. Les études disponibles avec des mesures à 50 m de haut se sont concentrées uniquement sur des sites situés à des altitudes élevées, au-dessus de 1200 m. Les sites bien exposés au vent et situés à des altitudes moyennes n'ont pas fait l'objet d'études. Les cartes et le matériel existants sont insuffisants pour faire des prédictions de rentabilité avec la technologie disponible aujourd'hui. Il manque des mesures pour des sites exposés situés à des altitudes comprises entre 800 m et 1200 m, car des sites situés à plus haute altitude n'existent pas dans le Canton du Jura.

A la Vue des Alpes, une vitesse de vent de 6.26 m/s à 40 m de haut serait de 7.20 m/s à 80 m avec un facteur de rugosité 3, soit 52% d'énergie électrique exploitable en plus.

Avec une rugosité de 2, une éolienne de 100 m aurait 26% d'énergie en plus qu'une éolienne de 60 m. Pour un appareil plus haut, le rotor peut lui aussi être agrandi, permettant de produire encore 2 à 2.5 fois plus d'électricité.

Direction principale du vent

Les directions principales du vent ont été mesurées pour les quatre sites neuchâtelois et sont reportées ci-dessous (Figure 25). Toutes tendent à donner la direction sud-ouest comme principale. On peut donc légitimement supposer que pour la chaîne du Jura, la direction principale du vent est le sud-ouest.

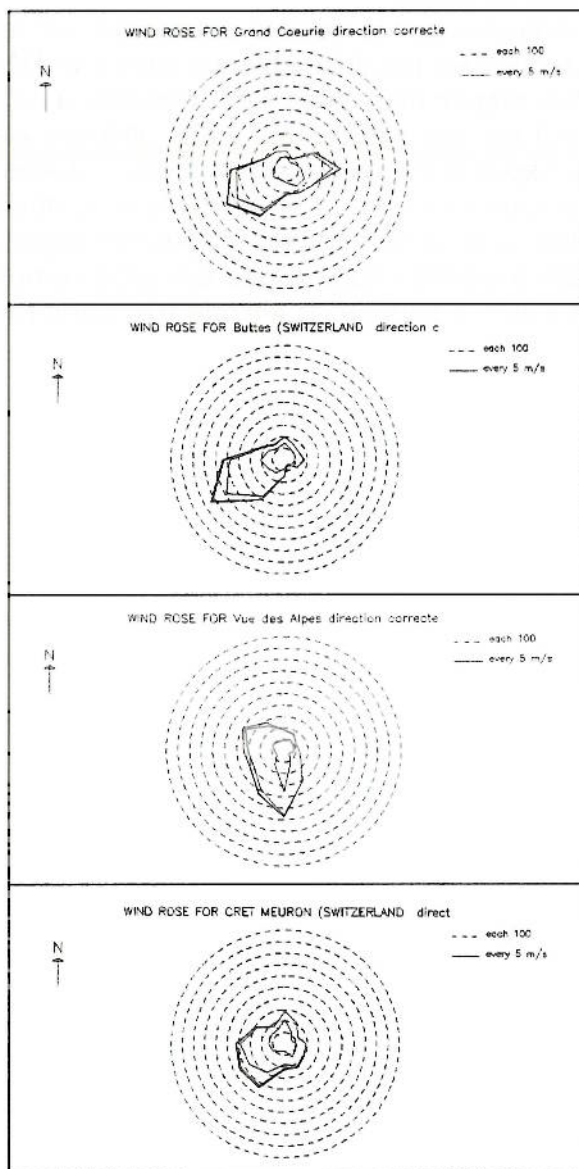


Figure 25 : Roses des vents montrant la direction du vent pour une année. © OFEN.

L'ENVIRONNEMENT

Les biotopes

Une bonne partie du paysage jurassien est constituée de forêts, de prairies ou de cultures à usage intensif, de pâturages ou encore de structures bâties comme des villages ou des routes. Les biotopes ne représentent que quelques pourcents de la surface totale, avec cependant de beaux exemples, comme les tourbières des Franches-Montagnes, les rives du Doubs ou les vergers de la Baroche.



Figure 26 : Prairie de culture intensive au printemps avec une prédominance de pissenlits. Le Peuchapatte.

Les sites visités durant cette étude étaient constitués de prairies, de cultures, de pâturages ou de zones boisées. Tous ces sites ont en commun le fait que l'on y retrouve que sporadiquement des restes de biotopes, l'utilisation massive d'engrais et leur exploitation intensive en ayant fait disparaître durant les 50 dernières années la plus grande partie. En effet, les prairies à cultures intensives, donc riches en engrais, sont actuellement fauchées plusieurs fois par années et les plantes typiques de ce genre de milieu, comme les pissenlits, sont les plantes dominantes (Figure 26). Dans ce genre de prairies, les espèces rares disparaissent. Le long de la

chaîne du Jura, la variété végétale s'enrichit considérablement au-delà de 1300 m d'altitude. En effet, à plus basse altitude, comme dans le Canton du Jura, la culture intensive est abondamment pratiquée dans les zones exploitables.

Sur certains sites potentiels pour l'exploitation de l'énergie éolienne, on retrouve parfois de petites structures de biotopes, comme, par exemple :

- des haies
- de la végétation sub-alpine ou alpine (Figure 27)
- des zones humides (Figure 28)
- des prairies à cultures extensives (Figure 29)



Figure 27 : Reste d'une végétation sub-alpine au-dessus de St-Brais (site du Plain), avec présence de gentianes jaunes (*Gentiana lutea*), d'orchis mâles (*Orchis mascula*) et de gentianes du printemps (*Gentiana verna*) dans les endroits où le calcaire affleure à la surface.

Les petites structures biotopes trouvées sur les sites sont actuellement menacées par l'agriculture intensive. L'ajout d'éoliennes ne représente en principe pas un danger pour ces biotopes, car les mâts ne prennent que très peu de place au sol et il est normalement possible de les placer de façon à éviter tout impact négatif. Le principal problème que pose l'implantation d'éoliennes sur un endroit sensible est plutôt la construction du chemin d'accès vers le site, dont l'emprise au sol est nettement supérieure à celle de l'éolienne elle-même.



Figure 28 : La photo de gauche montre les restes d'une prairie humide à utilisation extensive (au centre de l'image) au-dessus de Vellerat, avec la présence typique d'orchis de mai (*Dactylorhiza majalis*) comme détaillé sur la photo de droite.

Afin d'éviter l'impact sur les biotopes présents sur ou aux abords des sites, il est important de considérer les points suivants :

- Avant la planification d'un site, il faut contrôler la présence éventuelle de biotopes. Lors de la période végétale, qui commence vers le mois d'avril et qui se poursuit jusqu'à fin septembre, l'identification des structures de biotopes par un spécialiste est facile et ne nécessite que peu de moyens.
- Il est important de minimiser l'impact de la construction des chemins d'accès (Figure 30) et dans les cas où cela est envisageable, préférer des sites ayant déjà un accès utilisable.



Figure 29 : Reste de végétation typique d'une prairie extensive près du Peuchapatte (Point de Vue), avec des orchis mâles (*Orchis mascula*) et des trolles d'Europe jaunes (*Trollius europaeus*).

- L'implantation d'éoliennes peut s'accompagner de mesures de protection ou d'amélioration de biotopes, afin d'empêcher leur destruction totale par l'agriculture intensive et parallèlement de compenser l'impact des éoliennes sur le paysage.



Figure 30 : Parc éolien de Wiesensteig dans le Jura allemand (Bade-Wurtemberg). L'accès aux éoliennes, qui traverse la photo en bas de droite à gauche, est discret et les dégâts au sol minimes.

LE PAYSAGE

La protection du paysage est actuellement de loin l'argument le plus utilisé par les personnes sceptiques et les adversaires de l'énergie éolienne lors des discussions. L'effet de l'énergie éolienne sur le paysage n'est pourtant qu'esthétique et dépend dans une large mesure de l'opinion personnelle de chacun. Les éoliennes ont aussi un impact positif sur le paysage, dont elles sont un outil de protection efficace. En permettant la réduction des émissions de gaz carbonique et d'autres polluants générées par l'utilisation de combustible fossile lors de la génération d'électricité, elles aident à la préservation du climat et donc des paysages auxquels nous sommes habitués en Suisse (Figure 31).



Figure 31 : Fonte des glaciers due au réchauffement planétaire. En haut, le glacier du Pasterze en Autriche (1900 – 2000). En bas, le Fieschergletscher en Suisse (1900 – 2000). © Musée alpin suisse, Berne et Gesellschaft für Ökologische Forschung, Munich.

Position de la fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage

Parmi les plus sceptiques, la fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage (FSPAP) est opposée à l'énergie éolienne de façon fondamentale. Cette association, lors d'une prise de position, a déclaré⁵ que :

- Les parcs éoliens dès quatre turbines ne sont pas conciliables avec la protection du paysage.

⁵ Energie éolienne et protection du paysage, prise de position de la FSPAP du 19 juin 2001.

- Tous les projets actuels en Suisse sont conflictuels.
- Il faut limiter la hauteur des éoliennes à 45 m au maximum au niveau de la nacelle.

Limiter la hauteur des mâts à 45 mètres a plusieurs effets. Les éoliennes de petite puissance sont économiquement moins efficaces et induisent une lourde charge sur le paysage, du fait du nombre bien plus élevé d'installations nécessaires à la production de la quantité d'énergie planifiée par l'OFEN. Ainsi la densité des appareils augmente fortement. Autre conséquence pour le paysage, la fréquence de rotation du rotor est bien plus rapide pour des éoliennes de petite taille, procurant une impression de stress. A 45 m le vent est freiné par les obstacles naturels et il faudrait donc choisir des sites extrêmement exposés et visible comme le sommet de Chasseral pour avoir un vent suffisant. Sous ces conditions, il n'y a plus aucun site exploitable dans le Canton du Jura, car à cette hauteur le vent n'est plus assez fort. Un appareil de 2.5 MW et de 100 m de haut à la nacelle peut remplacer entre 8 et 10 appareils de 500 kW et de 40 m de mât sur un site comme celui de Mont-Crosin. Une limitation de la hauteur du mât ne rend pas seulement l'énergie éolienne inefficace, mais l'impact sur le paysage par kWh d'électricité produite est lui aussi plus important.

Les grands parcs éoliens proposés par la FSPAP, soit plus de 4 éoliennes, sont à comparer avec les chiffres espagnols : pour environ 3'660 éoliennes en Espagne en 2001, on comptait 207 parcs, donnant ainsi une moyenne de 30 éoliennes par parc. S'il est clair que les conditions topographiques de la Suisse ne sont pas les mêmes qu'en Espagne, il existe ici aussi des sites où l'on peut facilement installer plus de quatre appareils. La mise en oeuvre des recommandations de la FSPAP condamne l'énergie éolienne à ne jouer qu'un rôle insignifiant dans la production électrique du pays. Il faudrait donc continuer à produire l'énergie de manière non renouvelable, et donc accepter les déchets nucléaires et le changement du climat induit par les émissions des combustibles pétroliers.

Position des associations de protection de la nature



Figure 32 : Village rural de Legau près du lac de Constance, avec une éolienne de 600 kW et 100 m de haut, appartenant à des agriculteurs du village et donnant un aspect moderne et dynamique au paysage environnant.

En règle générale, cette forme de production d'énergie est acceptée, voir soutenue par les associations de protection de la nature, comme le WWF, Greenpeace, ou d'autres.

Un des avantages des éoliennes de grandes tailles réside dans le fait qu'on peut les installer sur le plateau des Franches-Montagnes, tout en restant économiquement compétitif. Il est en effet plus facile d'intégrer au paysage de grandes éoliennes dans les Franches-Montagnes que de petites sur des sites très bien exposés comme la crête du Chasseral.

RESULTATS

GENERALITES

Les meilleurs sites pour l'énergie éolienne dans le Canton du Jura se trouvent aux altitudes les plus élevées, soit entre 800 m et 1150 m, car la vitesse du vent dépend d'une manière marquée de l'altitude et de l'exposition des sites. Le programme WINFO mis à disposition par l'entreprise Meteotest permet d'estimer la vitesse du vent en chaque point du territoire. Les prévisions calculées par ce programme donnent des vitesses de vent maximales de 5,3 m/s à 50 m au-dessus du sol pour le Canton du Jura. La limite minimale pour une exploitation économique du vent se situe autour de 5,5 m/s. Malgré de ces prévisions peu encourageantes, nous estimons qu'il existe un bon potentiel dans le Canton du Jura pour une utilisation de l'énergie éolienne pour les raisons suivantes

- Une comparaison basée sur des mesures dans le Jura neuchâtelois et une analyse du site du parc éolien sur le Mont-Crosin montrent que la vitesse du vent est sous-estimée par le programme WINFO. Il existe en effet une différence importante entre les mesures de la vitesse du vent dans le Jura neuchâtelois et les prévisions.
- A une distance d'environ 100 à 300 km au nord-est du Canton du Jura, dans le Jura du Bade-Wurtemberg et la Forêt-noire allemande, de plus en plus d'éoliennes sont exploitées sur des sites situés entre 600 m et 1000 m d'altitude seulement. Ces installations sont mieux adaptées aux conditions géologiques de la chaîne jurassienne que les éoliennes du Mont-Crosin, notamment par une hauteur de mâts bien plus élevée. Avec des tailles de 70 mètres et plus à la hauteur de la nacelle, ces appareils profitent de vents moins turbulents et donc plus forts. La puissance moyenne de ces éoliennes est comprise entre 750 kW et 2,5 MW, avec une tendance à l'accroissement de la hauteur et de la puissance.

Il n'existe malheureusement pas de mesure de vitesse du vent dans l'arc jurassien de la région du Canton du Jura pour des hauteurs de plus de 50 mètres au-dessus du sol et à des altitudes comprises entre 800 m et 1300 m. Les mesures Sodar

effectuées en été 2002 par l'entreprise Juvent SA sur le site du Mont-Crosin et donnant les vitesses à une hauteur de 150 m n'ont pas été disponibles pour cette étude.

Finalement, l'analyse des pays frontaliers montre que tous, soit la France, l'Allemagne, l'Italie et l'Autriche sont favorables à cette nouvelle forme d'énergie.

Moyennant une volonté politique forte, le Canton du Jura a les moyens de se profiler comme le leader suisse de l'énergie éolienne (voir le chapitre suivant).

SELECTION DES SITES

Les observations faites grâce aux différentes cartes et aux visites des sites ont permis de dégager plusieurs régions comme étant potentiellement favorables pour l'installation d'éoliennes. Au sein de ces régions, appelées ici microrégions, diverses zones ont été sélectionnées et étudiées en détail avec les critères retenus dans la partie *Critères*. Ces zones ne sont pas à proprement parlé des sites, mais plutôt un ensemble de sites présentant des caractéristiques homogènes.

Les résultats seront donc présentés en partant des microrégions retenues pour aller vers les sites eux-mêmes. La description précise de chaque site est donnée en annexe.

Microrégions potentiellement intéressantes

Les microrégions définies dans la partie *Démarche* sont reprises ici et décrites en fonction des observations effectuées sur le terrain. Leurs caractéristiques générales sont mentionnées sur la carte et dans le tableau ci-après (Figure 33 et Tableau 3), qui donnent un aperçu des onze microrégions et des critères ayant servi à les sélectionner.

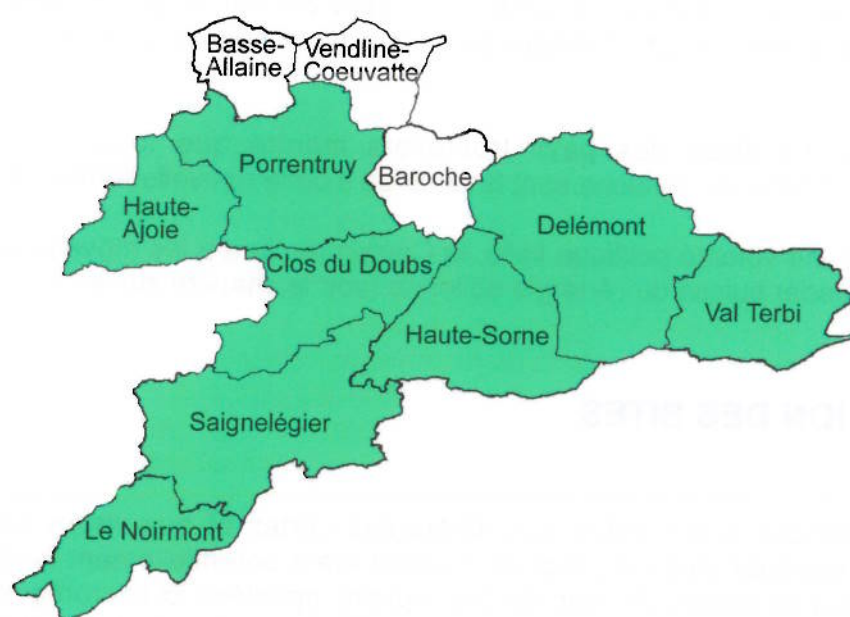


Figure 33 : Les microrégions en couleur sont celles offrant des ressources en vent éventuellement suffisantes pour son exploitation énergétique.

1.	Basse-Allaine	Région d'accès facile, mais située à une altitude relativement basse donc peu ventée. Potentiellement intéressante en fonction de l'avancée de la technologie.
2.	Vendline-Coeuvatte	Région d'accès facile, mais située à une altitude relativement basse donc peu ventée. Potentiellement intéressante en fonction de l'avancée de la technologie.
3.	Haute-Ajoie	Région d'accès facile, mais située à une altitude relativement basse donc peu ventée. Potentiellement intéressante en fonction de l'avancée de la technologie.
4.	Porrentruy	Région montagneuse dans le sud présentant un potentiel pour l'énergie éolienne, mais avec des sites de petite taille et un accès difficile. Urbanisé dans le centre.
5.	Baroche	Région très vallonnée n'offrant pas de sites bien exposés de taille suffisante.
6.	Clos du Doubs	Région retenue en raison de son excellente exposition vers le sud-ouest et de son altitude moyenne élevée.
7.	Delémont	Régions montagneuses au nord et au sud de la vallée offrant des sites potentiels. La partie située au sud n'offre que quelques petits sites d'accès difficile, alors que la partie située au nord offre de grandes étendues bien exposées aux vents et d'accès aisé. Région retenue pour sa partie nord.
8.	Haute-Sorne	Région située au nord d'une chaîne de montagnes élevées et donc ne bénéficiant pas d'un dégagement optimal vers le sud-ouest.
9.	Val Terbi	Région potentiellement intéressante, mais présentant un accès difficile et des surfaces exposées restreintes.
10.	Saignelégier	Région retenue en raison de son altitude élevée et de ses surfaces dégagées considérables.
11.	Le Noirmont	Région retenue en raison de son altitude élevée et de ses surfaces dégagées considérables.

Tableau 3 : Descriptif des microrégions analysées.

La carte de la Figure 34 montre les communes sur lesquelles des sites potentiellement intéressants ont été trouvés. Cinq régions ont été définies présentant des caractéristiques semblables d'un point de vue éolien :

1. Région bleue

Altitude favorable pour l'exploitation du vent, comprise entre 900 m et 1180 m. Beaucoup de sites potentiels dont l'intégration paysagère est relativement aisée, car ils sont sur un plateau et non sur une crête exposée. Le potentiel excède 40 éoliennes pour une puissance pouvant dépasser 100 MW. Le paysage de cette région se prête bien à la construction d'éoliennes solitaires, aussi bien que de petits ensembles.

2. Région verte

Altitude de 900 m et très bonne exposition au vent avec de la place pour une dizaine d'éoliennes, représentant une puissance d'environ 20 MW. L'alignement de la chaîne montagneuse dans la direction principale du vent rend nécessaire une répartition relativement importante des éoliennes sur le site. Le Clos-du-Doubs est déjà chargé par une ligne électrique de 380 kV.

3. Région jaune

Zone située à une altitude comprise entre 800 et 900 m et bénéficiant d'une bonne exposition au vent. Place pour une puissance d'environ 20 MW, soit une dizaine d'éoliennes.

4. Régions roses

Des sites potentiels se trouvent dans ces régions relativement élevées, situées entre 800 m et 1200 m. Elles ont cependant certains inconvénients qui peuvent être liés à l'accès, à l'exposition au vent, à la taille trop restreinte du site ou au paysage.

5. Régions blanches

Régions de basses altitudes et peu ventées, situées dans des vallées, des plaines ou possédant des hauteurs inaccessibles. Certaines font aussi partie de zones protégées.

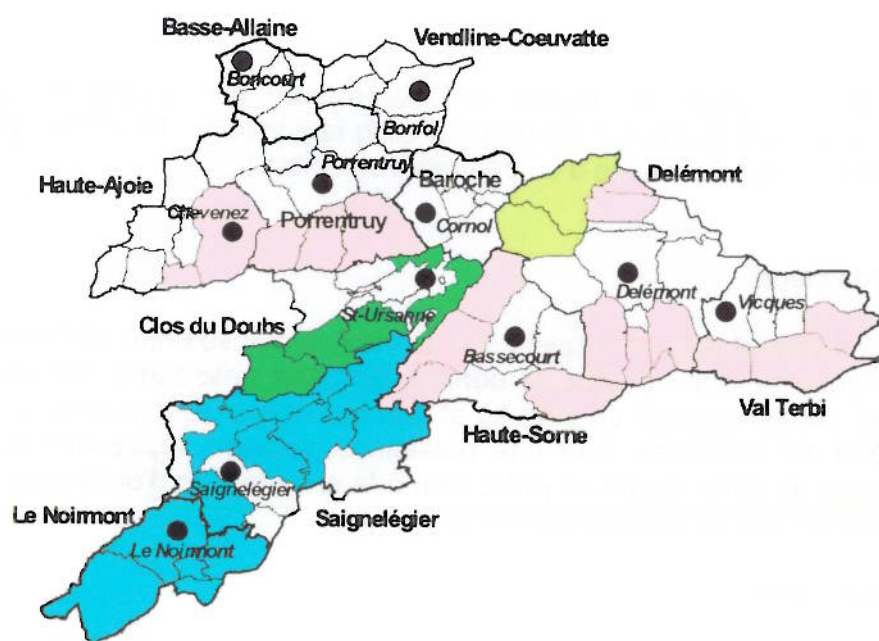


Figure 34 : Carte des microrégions et des communes jurassiennes. Les cinq différentes zones de caractéristiques similaires y sont représentées.

Sites prioritaires

Les sites sont répartis en trois catégories différentes :

Catégorie	Appréciation
	Favorable
	Moyen
	Mauvais

Le Tableau 4 donne un récapitulatif des fiches de description des sites (Annexe 5) et présente pour chacun d'eux une appréciation sous forme de couleur représentant les catégories d'appréciations. La Figure 35 montre ces sites sur le territoire cantonal, en reprenant le modèle des couleurs.

Commune(s) Site(s)	Surface (km ²) / Altitude (m)	Biotopes	Vitesse du vent (m/s)	Exposition	Accès	Impression générale
Les Bois Maison Rouge Rosées Dessous	1/1000		4.3			
Les Bois Crêt Brûlé	2/1060		4.4			
Les Bois Le Boéchet	0.5/1040		4.4			
Les Bois / Le Noirmont Le Peu-Claude	1.5/1110		4.7			
Le Peuchapatte Le Point de Vue	1.5/1170		5.1			
Les Breuleux Rond Rochet	0.5/1120		5.0			
Muriaux / La Chaux- des-Breuleux Le Roselet	1/1060		4.7			
Muriaux Les Esserts Belarts	1.5/1020		4.6			
Muriaux Derrière le Cras Les Chargeoux	1/990		4.5			
Les Pommerats Champs Marion – A la Croix	0.5/900		4.2			
Le Bémont Pâturage du Praissalet	1/1000		4.5			
Les Enfers Fin des Plainbois Prés Brahier Fin des Esserts	1.5/970		4.6			
Montfaucon / Les Enfers Sur le Tiat Sur le Begnon	0.5/1010		4.7			
Saint-Brais Le Plain	0.25/1045		5.1			
Saint-Brais Ban Dessus	0.5/990		4.8			
Lajoux Rond Pré	0.5/1010		4.7			
Lajoux Gros Meurgis	0.25/1045		5.0			
Saulcy Le Finet	0.5/930		4.6			
Saulcy Gros Pré des Perches	0.5/950		4.6			
Montmelon Sur la Croix	0.25/860		4.7			
Montmelon Chez Basuel	0.5/930		4.7			
Montmelon Mont Russelin	0.25/870		4.7			

Epauvillers / Epiquez Le Caron	1/910		4.6			
Epiquez Pré la Chiate	2/905		4.5			
Epiquez Mont Rossat	0.5/900		4.5			
Epiquez / Soubey Le Bail	1/900		4.5			
Vermes Schönenberg	0.25/1185		5.5			
Vellerat La Montagne	0.25/1060		4.6			
Coutételle / Souce Mont Dessus	1.5/1040		4.7			
Movelier Sur la Prire	0.5/750		4.1			
Pleigne Grossfeld/ Löwenburg	0.5/620		3.8			
Pleigne Rouges Terres Le Truchet La Morlatte Haut des Planches Le Toré	4/820		4.3			
Bourrignon Les Mermets Dessus Sur la Chaux	1.5/880		4.4			
Bourrignon / Delémont Les Côtes La Haute Borne	1/900		4.6			
Fahy	Toute la région/580		3.7			
Roche d'Or Faux d'Enson	0.25/920		4.7			
Chevenez Vacherie Dessus	1/890		4.5			
Fontenais Les Chainions	0.5/800		4.6			

Tableau 4 : Classification des sites selon leur degré de priorité.

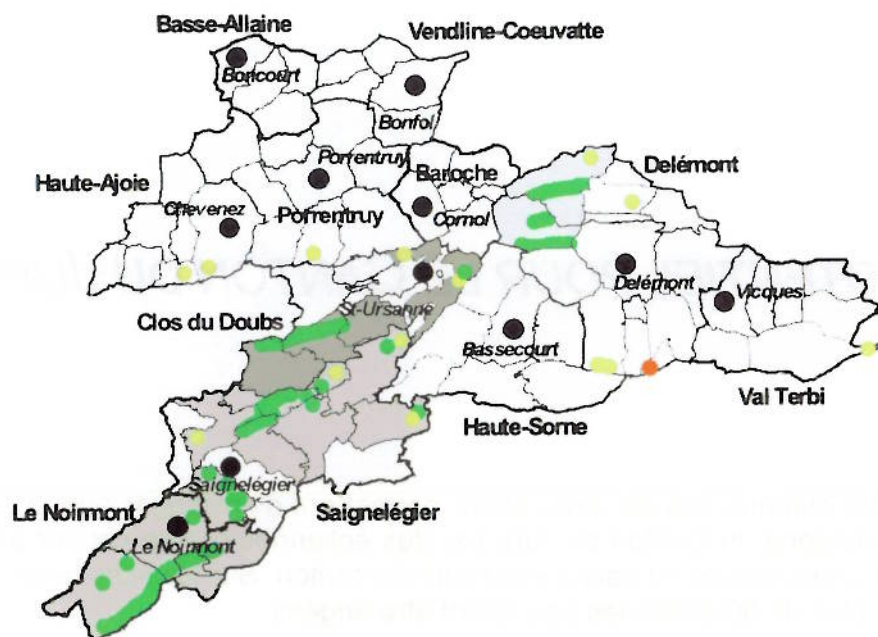


Figure 35 : Zones potentiellement intéressantes pour l'exploitation du vent selon leur degré de priorité.

Remarque : pour tous ces sites potentiels, quelle que soit leur priorité, le manque d'informations fiables sur les vitesses du vent rend des mesures de vitesses du vent nécessaires pour cerner exactement leurs qualités.

Impact sur l'environnement et le paysage

L'impact négatif des éoliennes sur les biotopes et la nature est minimal dans ces régions. Il peut être évité en analysant les sites avant la mise en place des infrastructures et des éoliennes. Il est même possible de créer un impact positif si des mesures de compensation requérant peu de moyens sont mises en place.

L'influence des éoliennes sur le paysage n'est qu'une notion esthétique et donc individuelle. Les appareils ayant une hauteur de plus de 50 m au niveau de la nacelle induisent parfois des réactions de rejet chez certaines personnes, spécialement en Suisse. Il faut souligner que cet inconvénient est compensé, par rapport à une petite éolienne, par la basse fréquence de rotation du rotor, le nombre ou la densité réduite des appareils et l'apparence majestueuse des grandes machines. A cela s'ajoute le fait que la quantité d'énergie propre produite et la rentabilité augmentent de manière rapide avec la hauteur et la puissance électrique de l'appareil. Le changement du paysage provoqué par les éoliennes évoque une image positive pour la majorité des gens, car l'utilisation des énergies renouvelables – contrairement à l'énergie fossile ou nucléaire – ne lègue pas de déchets et de problèmes environnementaux aux générations futures.

POTENTIEL POUR LE CANTON DU JURA

Les résultats obtenus lors de cette étude permettent d'envisager que la production électrique indigène du Canton du Jura par des éoliennes puisse couvrir une grande partie de la consommation totale d'électricité du canton. Sur les sites retenus comme favorables, plus de 50 éoliennes pourraient être érigées.

La consommation d'électricité totale du canton est équivalente à environ 413 GWh. Les 31'385 logements privés ont besoin d'un total de 94 GWh si la consommation moyenne de chaque ménage est de 3'000 kWh. Ces 94 GWh représentent donc 23% de la consommation totale du canton en électricité.⁶



Figure 36 : Une des deux éoliennes sur le Schillinger Berg dans la Forêt noire, placée à 730 m d'altitude. Les deux appareils Enercon 1.8 MW, avec des mâts de 85 m de haut, ont produit durant la première année de service 6.18 millions de kWh. Cette quantité d'électricité est suffisante pour satisfaire la consommation de plus de 2'000 logements, correspondant à 6.6% de la population jurassienne. Avec seulement 30 appareils de ce type et des conditions similaires de vent, le Canton du Jura pourrait couvrir la totalité de la consommation d'électricité des ménages cantonaux.

En utilisant des éoliennes de 1.8 MW, comme celles représentées à la Figure 36 et 37, et en prenant des vitesses du vent moyennes de 5.8 m/s à la hauteur de la nacelle, la consommation d'électricité des ménages jurassiens, soit 94 GWh, pourrait être couverte avec 35 éoliennes. En effet, chaque MW installé pouvant produire aux

⁶ Ces chiffres sont basés sur les données de l'Office fédéral de la statistique, avec 69'100 habitants dans le Canton du Jura et 31'385 logements. La fiche 8.01 du plan directeur cantonal admet une consommation totale d'électricité pour le canton de 415 GWh. On admet de plus une consommation moyenne d'électricité de 3'000 kWh par ménage.

alentours de 1.5 GWh par an, l'ensemble des 35 éoliennes fournirait plus de 94 GWh.

En 20 ans, durée de vie moyenne des installations, on éviterait ainsi l'émission dans l'atmosphère de plus de 1.8 millions de tonnes de gaz carbonique, soit 900 millions de m³, ou 42'000 camions chargés de 24 tonnes de charbon (50% de pureté). L'équivalent nucléaire est de quatre tonnes de déchets radioactifs, qui sont ainsi épargnés aux générations futures.

Pour arriver au même résultat, soit la couverture en électricité des ménages jurassiens, il faudrait environ:

- 94 éoliennes de 660 kW
- 63 éoliennes de 1.0 MW
- 35 éoliennes de 1.8 MW
- 23 éoliennes de 2.3 MW
- 16 éoliennes de 3.2 MW
- 10 éoliennes de 4.5 MW

et 45 éoliennes de 4.5 MW pour couvrir l'ensemble de la consommation électrique du canton, ménages, services et industries comprises.

Figure 37 : La seconde éolienne sur le Schillinger Berg, appartenant à la population locale et approvisionnant 1'000 ménages des alentours, est bien loin de détruire le paysage. Au contraire, elle permet de le protéger en diminuant les rejets de CO₂ de 1'800 tonnes annuellement, parallèlement à une réduction des déchets nucléaires.



La mise en service de 63 MW, soit la capacité de production de 94 GWh, en 10 ans est réalisable, le Bade-Wurtemberg ayant quasiment installé cette capacité durant la seule année 2002 (Figure 38).

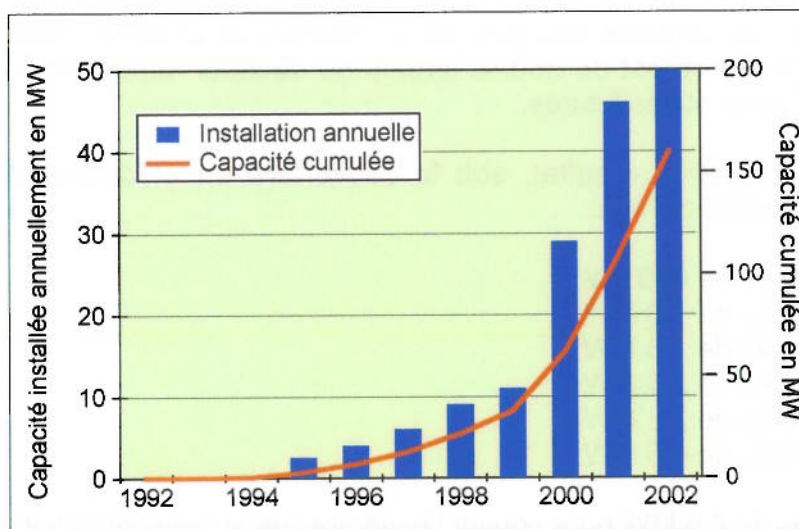


Figure 38 : Capacité éolienne installée annuellement et capacité totale cumulée dans le Bade-Wurtemberg. Alors que l'énergie éolienne n'existait pratiquement pas en 1994, elle a connu un développement considérable dès l'an 2000. Les chiffres pour l'année 2002 sont provisoires et ne tiennent compte que des 9 premiers mois de l'année.

Quant à l'impact sur le territoire, la superficie du Canton du Jura étant de 839 km² et en prenant un rayon de 300 m minimum autour de chaque éolienne, soit environ 0.28 km² par éolienne, la surface influencée par 50 éoliennes est d'environ 14 km², ou 1.7% de la surface totale du territoire.