

État de l'art de l'éolienne thermique

Option TYLOTEC 2025-2026

Version modifiée le 07/12/2025

Responsable : Albane TRUONG

Rédacteur : Joseph GRIFFART

Introduction.....	1
1. Principe de fonctionnement.....	2
2. L'éolienne domestique.....	2
a) Le vent en Bretagne.....	2
Le vent.....	2
Calcul du vent pour un projet.....	4
Le vent en Bretagne en pratique.....	5
b) Éoliennes verticales et éoliennes horizontales.....	6
Eoliennes horizontales (HWAT).....	6
Eoliennes verticales (VWAT).....	7
L'éolienne de type Savonius.....	7
c) La réglementation.....	8
d) L'éolienne domestique en Bretagne.....	9
3. Génération de chaleur par frein hydraulique.....	9
a) Chauffage par effet Joule par un agitateur.....	9
b) Le bouchotherme.....	11
4. Génération de chaleur par courant de Foucault.....	12
5. Génération de chaleur par pompe à chaleur (PAC) mécanique.....	13
6. Maturité des technologies.....	14
Bibliographie.....	16
Annexes.....	18
Tableau de méthodes alternatives pour déterminer le plan de vitesse d.....	18
Vents moyens sur l'année 2024 en Bretagne pour quinze villes majeures.....	19
Carte des ensembles paysagers breton.....	20

Introduction

Ce document traite de la conversion d'énergie éolienne en énergie thermique. Il s'intéresse d'abord à la composante vent en Bretagne, ensuite des différentes technologies permettant de réaliser cette conversion énergétique. Il a pour but de présenter la technologie et son potentiel en Bretagne pour une utilisation domestique.

1. Principe de fonctionnement

L'éolienne thermique est un type de dispositif ayant pour but de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie thermique. Cette conversion d'énergie peut se faire via trois méthodes :

- Un "frein hydraulique" ou "machine de Joule". Ce principe repose sur la création de chaleur par friction dans un liquide.
- L'utilisation d'un frein à courants de Foucault, par exemple en utilisant un ralentisseur de poids lourd dissipant l'énergie de rotation du rotor en chaleur [1]
- L'entraînement mécanique d'une pompe dans une pompe à chaleur

Le liquide utilisé, pouvant être de l'eau ou une autre sorte de liquide, pourra être utilisé dans un bâtiment, comme eau chaude sanitaire, eau de chauffage basse température ou eau pour un lave linge.

Le réservoir où se trouve le liquide sera calorifugé afin d'éviter les pertes thermiques. Il pourra être éventuellement accompagné d'un échangeur de chaleur dans le cas où le liquide agité n'est pas de l'eau.

Ne pas passer par une conversion en énergie électrique, par exemple avec une éolienne classique reliée à un chauffage électrique, est un atout non négligeable : on évite des pertes d'énergie à cause des rendements des différents convertisseurs. On obtient un système moins complexe, moins coûteux et plus robuste qu'un système traditionnel, soit quelque chose de très low-tech !

Par exemple, si la génération de chaleur est faite avec des courants de Foucault, dans des conditions de vent identiques, l'éolienne produira plus de chaleur que d'électricité : environ 6 % pendant les 12 mois, et pendant la saison froide, lorsque la vitesse du vent est plus élevée, entre 12 et 18 %. [26]

Le passage par un stockage thermique possède deux avantages :

- Le stockage permet de compenser l'intermittence de l'énergie éolienne, majeur défaut de cette méthode de génération d'énergie
- Le stockage thermique est plus simple techniquement et moins onéreux qu'un stockage par batterie au lithium. On estime qu'un stockage thermique est jusqu'à 70% moins cher qu'une alternative au lithium [2]. Sa construction est accessible pour un particulier, là où un stockage d'énergie électrique requiert des savoir-faire, machines et matériaux accessibles à peu de personnes.

2. L'éolienne domestique

a) Le vent en Bretagne

Le vent

Le vent est provoqué par le déplacement d'un gaz, notre atmosphère, à la surface du globe terrestre. Ce déplacement est induit par des changements de pressions, provoqués par des changements de températures.

Le vent est souvent caractérisé par deux paramètres :

- Sa vitesse, en km/h ou m/s. On peut la caractériser avec l'échelle de Beaufort
- Sa direction. (Nord, Sud, Est, Ouest, Nord-Est, ...)

Ces deux paramètres varient selon l'emplacement géographique et les saisons de l'année. Il est donc important pour notre étude de s'intéresser aux caractéristiques locales du vent en Bretagne et de s'y intéresser toute l'année.

Le vent à un point géographique précis n'est pas constant sur l'altitude où on le mesure. Généralement, plus on se trouve haut en altitude, plus sa vitesse est élevée. Cependant, pour un point géographique donné, sa direction est constante sur toute sa hauteur.

Le vent est influencé par le contexte géographique environnant. Il peut être influencé par :

- La rugosité du terrain (présence d'obstacles humains ou naturels perturbant la circulation du vent)
- La présence d'une grande étendue d'eau (lac, mer)
- La présence de relief

En Bretagne, le vent est plus fort le long du littoral et plus faible en intérieur des terres (présence de végétation, relief). La figure suivante montre une carte avec la vitesse moyenne du vent en janvier 2023 [21] sur le territoire breton. Les zones les plus foncées sont les zones avec le vent le plus faible.

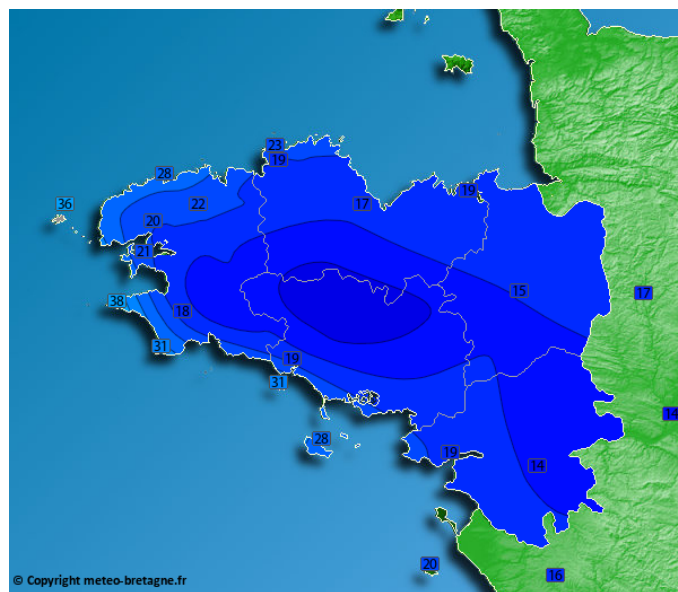


Figure 1: Vitesse moyenne du vent sur le territoire breton en janvier 2023 [21]

La distribution du vent sur une même verticale peut se représenter de la manière suivante. A gauche, le profil de vitesse du vent n'est pas perturbé par des obstacles, contrairement à la figure de droite.

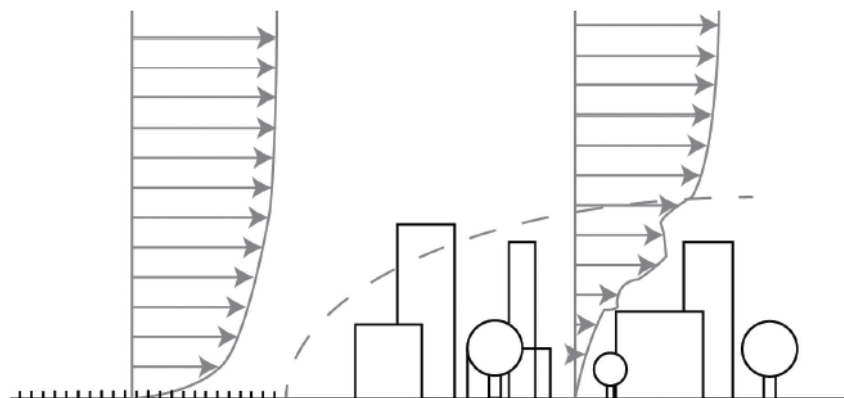


Figure 2 : Profil de vitesse du vent altéré par des obstacles au sol [10]

Calcul du vent pour un projet

Le paysage breton peut être classifié comme un paysage Européen de classe 2 [6]. Selon l'Atlas Éolien Européen [6], les données statistiques des stations météo bretonnes peuvent être appliquées à un territoire de 200km par 200km autour de la station. Ces statistiques concernent la variation des vents selon le jour, la semaine et l'année. Ce résultat est confirmé par les graphes des vents moyen en Bretagne en 2024 en [annexe](#) : même si les vitesses sont différentes, on observe un profil annuel similaire.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la distribution du vent à un endroit sur le globe. On peut citer la loi de puissance du vent [7], la loi logarithmique des vitesses [8] ou même la méthodologie utilisée dans l'Eurocode 1 [9].

La loi logarithmique des vitesses est une méthode fiable et pas trop compliquée pour déterminer le vent $u(z)$. Soit la formule suivante :

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]$$

où

- u_* est la vitesse de friction [m.s⁻¹]
- κ est la constante de von Karman, ici égale à 0,41
- d est le plan de vitesse nul [m]
- z_0 la longueur de rugosité [m]

Pour obtenir u_* , il est nécessaire de repasser par une mesure réelle du vent. Il est souvent facile de trouver une mesure de vent (ou calcul via des modèles météorologiques) à une altitude z sur tout le territoire français. Cette donnée peut se trouver sur le site du [Global Wind Atlas](#). Une fois une mesure du vent $u(z)$ connue, avec z connue, le calcul de u_* est direct.

La rugosité (ou longueur de rugosité) ne peut pas être généralisée à tout le territoire breton. Elle va dépendre du contexte géographique proche. Il faudra donc observer les environs du projet. Le tableau situé ci-dessous donne quelques valeurs de rugosité pour des paysages typiques.

En [annexe](#), se trouve une carte des ensembles paysagers bretons. Elle permet de se faire une bonne idée des environs larges d'un projet afin de déterminer une rugosité adaptée. En guise d'exemple, les environs de Brélidy se trouvent en zone "paysage boisé et de bosquets", on peut estimer la rugosité égale à 0,4 m environ.

z_0 [m]	Caractéristiques du terrain	Classe de rugosité
1.00	ville forêt	3
0.50	banlieue	
0.30	brise-vent	
0.20	beaucoup d'arbres et/ou buissons	2
0.10	terrain agricole d'allure fermée	
0.05	terrain agricole d'allure ouverte	
0.03	terrain agricole avec très peu de constructions, d'arbres <i>etc.</i> zones aéroportuaires avec des bâtiments et des arbres	1

Figure 3 : tableau récapitulatif de rugosité z_0 selon l'Atlas Éolien Européen [6]

Le plan de vitesse nulle d dépend également du contexte géographique proche. Une première approximation est de prendre comme valeur de d égale à $\frac{2}{3}$ de la hauteur des obstacles [8]. En annexe se trouve un tableau permettant de calculer d par d'autres méthodes plus précises.

Il existe une relation permettant de relier deux vitesses de vent à deux altitudes différentes, mais sur la même horizontale :

$$\frac{V(z_2)}{V(z_1)} = \frac{\ln(H_2/z_0)}{\ln(H_1/z_0)}$$

Le vent en Bretagne en pratique

La figure 1 montre que le vent en Bretagne n'est pas le même sur tout le territoire. Pour se donner une idée des ordres de grandeurs du vent moyen sur le territoire breton, une série de trois graphes représentant le vent moyen, par mois, sur l'année 2024, pour quinze villes en Bretagne est disponible en [annexe](#). Pour toutes ces villes, une tendance se dessine :

- Le vent est plus fort en hiver (20 à 25 km/h en janvier) qu'en été (14 à 18 km/h)
- Les villes situées à l'intérieur des terres (Pontivy, Fougères, Rennes, Carhaix-Plouguer) sont celles où le vent souffle le moins
- Les villes situées sur le littoral (Brest, Saint-Malo, Saint-Brieuc) sont celles où le vent souffle le plus fort
- La ville de Brest est située sur le littoral et sur la pointe nord-ouest de la péninsule armoricaine. Ces deux caractéristiques géographiques font qu'elle subit des vents bien supérieurs à la moyenne bretonne. De plus, au sud-ouest de Brest se trouve l'océan, zone où la rugosité est nulle, maximisant ainsi la vitesse du vent

Le vent peut venir de toutes les directions, mais il existe une prédominance sud-ouest sur tout le territoire breton. Ci-dessous, se trouve une rose des vents, mesurée à Brest [22], montrant la direction prédominantes des vents :

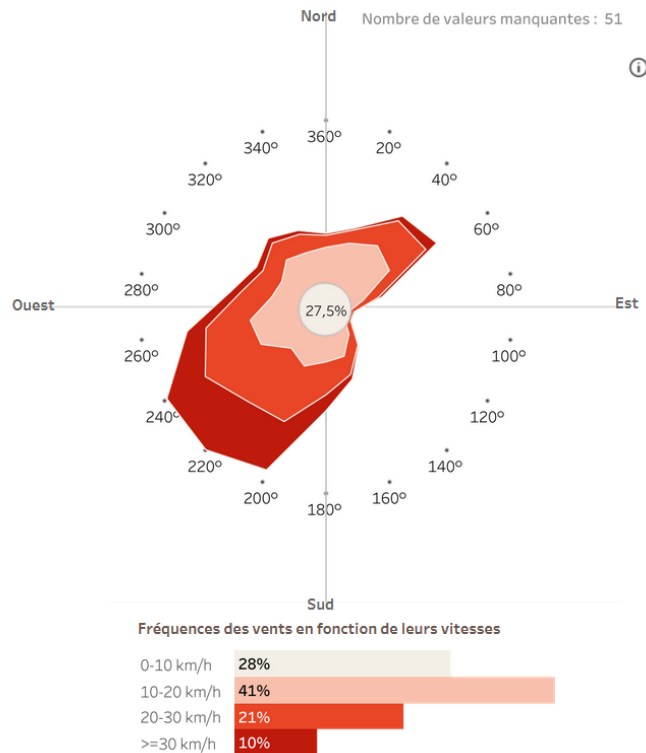
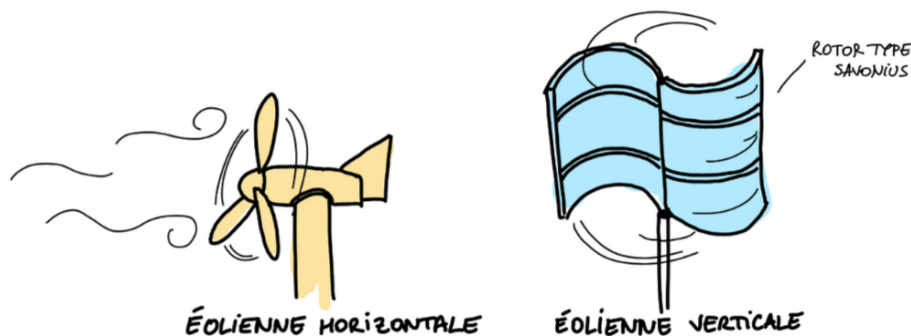


Figure 4 : Rose des vents indiquant la direction et la fréquence des vents mesurés à Brest [22]

b) Éoliennes verticales et éoliennes horizontales

Il existe deux types d'éoliennes, verticales ou horizontales, selon l'orientation de leurs rotor (axe des pales). Les éoliennes les plus couramment rencontrées sont des éoliennes horizontales à trois pales.



Éoliennes horizontales (HAWT)

Le principe de fonctionnement d'une HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) est basé sur la portance, une force qui pousse un objet vers le haut lorsque l'air circule sur sa surface. Les pales ont la forme de profils aérodynamiques, créant une différence de pression entre leurs surfaces supérieure et inférieure lorsque le vent souffle. Cette différence de pression fait tourner les pales autour de l'axe horizontal, entraînant ainsi le rotor.

Le plan du rotor d'une HAWT doit être aligné avec la direction du vent pour maximiser son efficacité. Ainsi, une HAWT dispose d'un capteur de vent et d'un système de lacet qui ajustent l'orientation de la nacelle en fonction de la direction du vent.

Les HWAT ont l'avantage d'avoir de meilleurs rendements (en général) que des éoliennes verticales. De plus, leur configuration leur permet d'être installées à une plus grande hauteur, profitant ainsi de vents plus forts et plus constants. Cependant, du fait qu'elles doivent être constamment redirigées selon la direction principale du vent et qu'elles soient construites plus haut, elles sont généralement plus chères et plus complexes. Cela les rends moins accessibles pour une utilisation domestique. De plus, une configuration horizontale requiert un vent plus fort pour les démarrer, ce qui est problématique lorsqu'on les installe à des plus basses hauteurs, comme dans le cas des éoliennes domestiques.

Eoliennes verticales (VWAT)

Le principe de fonctionnement d'une VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) est basé sur la traînée, une force qui s'oppose au mouvement d'un objet lorsque l'air passe dessus. Les pales, qu'elles soient symétriques ou asymétriques, créent une traînée variable lorsqu'elles font face ou s'opposent au vent. Cette différence de traînée fait tourner les pales autour de l'axe vertical

Le plan du rotor d'une VAWT n'a pas besoin d'être aligné avec la direction du vent car il peut capter le vent de n'importe quelle direction. Par conséquent, une VAWT ne dispose pas de système de lacet ni de capteur de vent.

Les VWAT ont l'avantage d'être moins chères car elles ont une construction plus simple et sont souvent moins hautes. De plus, leur configuration fonctionnant principalement sur l'utilisation de la traînée fait qu'elles démarrent pour des vents plus faibles (voire dès que le vent tourne). Un dernier avantage est que leur encombrement est plus faible, rendant leur installation dans des zones encombrées (en ville par exemple) possible. Cependant, elles sont souvent moins efficaces que leurs homologues horizontales.

L'éolienne de type Savonius

Un type d'éolienne très populaire pour l'éolien domestique est une VAWT de type *Savonius*.

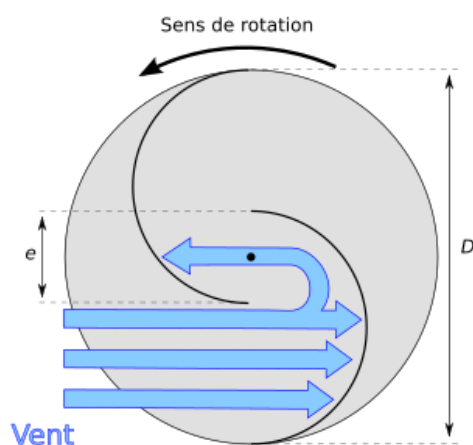


Figure 5 : Coupe horizontale dans un rotor de type Savonius



Figure 6 : Rotor Savonius hélicoïdal

Ce type d'éolienne possède des pales en arc de cercles, disposées en quinconce comme sur l'image ci-dessus. Il existe deux types de rotors Savonius : les rotors cylindriques et hélicoïdaux. Ces derniers permettent d'avoir un couple moteur plus constant, plutôt que par alternance lorsqu'un des godets est dans l'axe du vent. Cependant, leur fabrication est plus compliquée [5]. Les avantages et inconvénients de ce type de rotor (cylindrique ou hélicoïdal) sont résumés dans le tableau suivant [5] :

Avantages	Inconvénients
Peu encombrante : axe vertical	Faible rendement
Peu bruyante	Masse non négligeable
Démarré à de faibles vitesses de vent	Couple non constant
Couple élevé au démarrage	
Pas de contraintes sur la direction du vent	

Le rendement de ce type de rotor dépend du *tip-speed ratio* λ , décrivant le rapport entre la vitesse en bout de pale (induite par la rotation) et la vitesse du vent. On peut s'attendre à un rendement, noté C_p , de 25% en moyenne pour un rotor cylindrique [28].

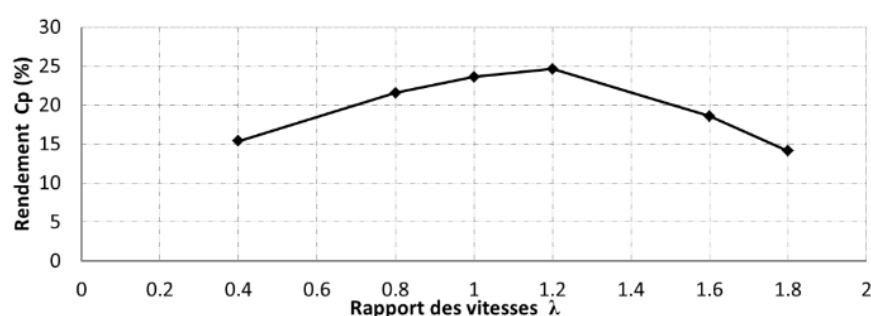


Figure 7 : Rendement C_p d'une éolienne Savonius selon le *tip-speed ratio* [28]

Ce rendement est encore très dépendant de la géométrie de l'éolienne, la littérature scientifique peut donner d'autres valeurs, mais reste autour de 0,25.

Même si elle est souvent qualifiée "d'éolienne de traînée", elle peut être aussi vue comme une "éolienne de portance". Son efficacité au démarrage est en effet essentiellement due à la traînée, mais son maintien en rotation, lui, est principalement dû à la force de portance. [28]

c) La réglementation

L'installation d'éoliennes domestiques, et des éoliennes en général, est soumise à des réglementations en France. Ces réglementations concernent à la fois la taille, la hauteur du dispositif et son emplacement.

Lors de l'installation d'une éolienne domestique, il pourra être obligatoire de déposer des déclarations ou permis de construire aux autorités compétentes selon la taille de l'éolienne [3]. Le type de déclaration à faire est résumé dans le tableau suivant :

Éolienne mesurant entre 12 et 50 mètres.	Permis de construire.
--	-----------------------

Éolienne de moins de 12 mètres.	Dispense de toute formalité (sauf à l'intérieur des secteurs spécialement protégés listés à l'article R421-11 du code de l'urbanisme où elles sont soumises à déclaration préalable).
---------------------------------	---

Les secteurs protégés cités dans l'article R421-11 sont surtout les environs proches des sites patrimoniaux classés aux inventaires des monuments en France.

Dans le cas où la zone d'implantation se trouve dans une zone de servitude aéronautique, il faudra une consultation de la Direction Générale de l'Aviation Civile. [4]

L'emplacement dans la parcelle de son installateur.ice est également réglementée. C'est l'écartement entre l'implantation et la limite parcellaire qui est à surveiller. Il n'y a pas de règle commune, mais c'est généralement indiqué dans le PLU. Cependant, il est usuel de voir une distance minimale à respecter égale à 1,5 ou 2 fois la hauteur de l'éolienne installée.

Il est également conseillé d'avertir le voisinage dans un rayon de 500m autour de l'emplacement de l'éolienne. [4] Même si cela n'est pas obligatoire, il serait dommage de démarrer une guerre du voisinage !

d) L'éolienne domestique en Bretagne

Il est donc pertinent d'utiliser la force éolienne pour générer de la chaleur en Bretagne. En résumé, le vent en Bretagne est :

- Supérieur à la moyenne française car le territoire breton est une péninsule. On estime que 78% des communes bretonnes sont exposées au risque naturel "tempêtes et vents" contre 18% pour le territoire métropolitain [24]
- Plus élevé en hiver, saison où le besoin en chaleur est élevé [annexe]

Localement, beaucoup de territoires, notamment les plus peuplés, se trouvent sur le littoral, là où le vent est le plus fort. Les habitant.es désirant utiliser cette technologie de génération de chaleur ont alors plus de chance de se trouver dans des zones venteuses.

Le besoin de se chauffer en Bretagne est majoritaire face au besoin de se refroidir (pour l'instant), les trois technologies d'éoliennes thermiques sont donc pertinentes sur le territoire breton.

3. Génération de chaleur par frein hydraulique

a) Chauffage par effet Joule par un agitateur

Le chauffage d'un liquide par frein hydraulique repose sur l'effet Joule. En effet, agiter l'eau fait entrer les molécules en mouvement, ce qui augmente leur énergie cinétique. Grâce aux mouvements turbulents générés dans le récipient, l'énergie cinétique est transformée en énergie thermique. C'est sur ce principe que reposent le frein hydraulique et l'éolienne thermique.

Ce type de dispositif est toujours composé d'une éolienne (horizontale ou verticale), d'un rotor entraînant un agitateur et d'une cuve calorifugée.

L'agitateur est composé d'un assemblage de pales concentriques, reliées à un axe. Le nombre et la forme des pales peut varier mais il existe des configurations optimales:

- Des pales de forme carrés et planes sont optimisées et ont l'avantage d'être faciles à fabriquer, même pour un particulier sans machine de fabrication [13]
- Le nombre de pales n'influence pas forcément l'efficacité.[12]
- Plus la surface des pales augmente, plus l'eau s'échauffe rapidement [17]
- L'agitateur doit être suffisamment recouvert d'eau afin d'optimiser l'échauffement de l'eau. Plus l'eau est haute dans la cuve, plus l'efficacité augmente [17]

Le résultat lié au troisième point peut se voir sur la figure suivante. Dans cette expérimentation, les chercheur.es ont créé trois groupes (S,A,B) où on fait varier le nombre de pales (2 ou 4 pales), et leur espacements (groupe A et B). Les résultats montrent que le nombre de pales influence l'échauffement, mais pas leur espacement entre elles.

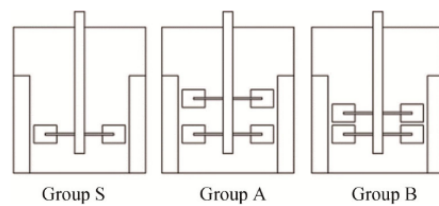


Fig. 4 Layer number of the stirring rotor of three experimental groups

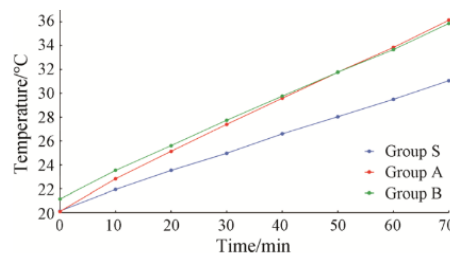


Figure 8 : Influence de la taille des pales d'un rotor [17]

L'agitateur et les chicane doivent être dessinés pour limiter au maximum la cavitation dans le liquide agité. Pour rappel, la cavitation est un phénomène où des bulles de gaz apparaissent lorsqu'un liquide subit une dépression rapide. Cette cavitation provoque deux effets délétères :

- Évaporation locale réduisant l'efficacité de l'installation
- Risque de dommages du dispositif à cause la création de chutes locales de pressions

La cuve est de forme cylindrique, elle possède des "chicanes" disposées régulièrement et de façon concentrique sur la surface intérieure de la cuve. Ces chicane permettent d'accentuer la création de courants turbulents dans la cuve, renforçant l'échauffement du liquide. [12]

Il existe un nombre optimal de chicane dépendant du diamètre et de la taille des chicane [12].

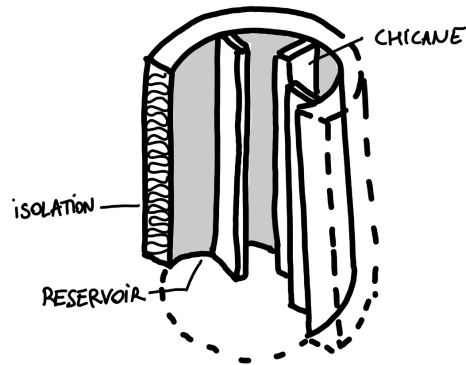


Figure 9 : Schéma de la cuve calorifugée

Il est nécessaire d'isoler thermiquement la cuve pour limiter au maximum les pertes thermiques pour améliorer le rendement du dispositif. Cette cuve doit également être fermée pour supprimer les pertes par évaporation du liquide [12].

Le liquide utilisé dans la cuve calorifugée peut être de l'eau, de l'huile ou tout autre liquide ayant une bonne capacité thermique et une bonne viscosité. Même si l'idée d'utiliser un liquide autre que l'eau peut être séduisante, l'eau reste un bon compromis :

- Elle possède une bonne capacité thermique
- Elle s'échauffe à une vitesse satisfaisante [12] [17]
- Elle est facile à trouver, l'eau de pluie pourrait être envisagée
- Elle n'est pas toxique pour l'environnement

Cependant, l'influence des caractéristiques du fluide, comme sa viscosité, à basse vitesse de rotation doit être encore étudiée [17]. Il faudra faire attention à ne pas utiliser des fluides avec des trop grosses capacités thermiques; le processus d'échauffement met plus de temps si la capacité thermique du liquide est élevée. Donc pour des zones où le vent est très intermittent, l'efficacité de l'installation baissera [17].

Dans le cas de l'utilisation de l'eau, il pourra être nécessaire d'y ajouter un produit antigel (uniquement si l'eau est en système fermée dans la cuve). On pourra s'y prémunir si jamais la cuve est installée à l'intérieur de l'habitation.

Il y a deux choix dans l'utilisation de l'eau chauffée :

- Utilisation directe
- Utilisation pour réchauffer l'eau d'un système auxiliaire dans un échangeur de chaleur

Le deuxième montage, avec échangeur de chaleur, possède l'avantage d'être cumulable avec une autre technologie de génération de chaleur (panneau solaire thermique, poêle bouilleur, ...). Ce montage permet également de placer un chauffage électrique d'appoint, réchauffant l'eau quand la production grâce à l'énergie éolienne n'est pas suffisante.

b) Le bouchotherme

Le *bouchotherme* est une variante de l'éolienne thermique qui utilise la force de l'eau pour générer le mouvement de l'agitateur. Même si ce dispositif s'écarte du propos initial du document, il reste intéressant pour toute personne ayant un cours d'eau sur sa parcelle.

Le principe de cette installation a été inventé par Claude Bouchot. Le dispositif est installé dans un ancien moulin à eau, le Moulin d'Apach situé en Moselle.

La force de l'eau est récupérée par une roue à aube, elle est transmise dans un axe relié à une turbine. C'est cette turbine, de type *Francis 1942*, qui réchauffera l'eau par effet Joule. L'eau présente dans la turbine est reliée à un système de chauffage basse température en circuit fermé qui chauffe la partie privée de l'habitation. Ce dispositif peut atteindre une chaleur de 65°C grâce à la grande force de l'eau récupérée dans le cours d'eau. [11]



Figure 10 : Turbine et bouchotherme (en rouge) du Moulin d'Apach [11]

4. Génération de chaleur par courant de foucault

Il existe une autre méthode permettant de transformer l'énergie cinétique en énergie thermique. Cette méthode repose sur les courants de foucaults et l'utilisation d'un frein par champs électromagnétiques s'échauffant au cours du freinage.

Un des dispositifs possibles transformant l'énergie cinétique en énergie thermique est un ralentisseur de poids lourd. Un champ électromagnétique parcourant deux plateaux s'oppose à la rotation d'un disque métallique placé entre ces derniers. L'énergie du disque se dissipe alors sous forme de chaleur. Plus le disque tourne vite, plus le système est efficace. Cet équipement est généralement monté sur l'arbre de transmission, sur le pont ou sur la boîte de vitesses du véhicule [15].

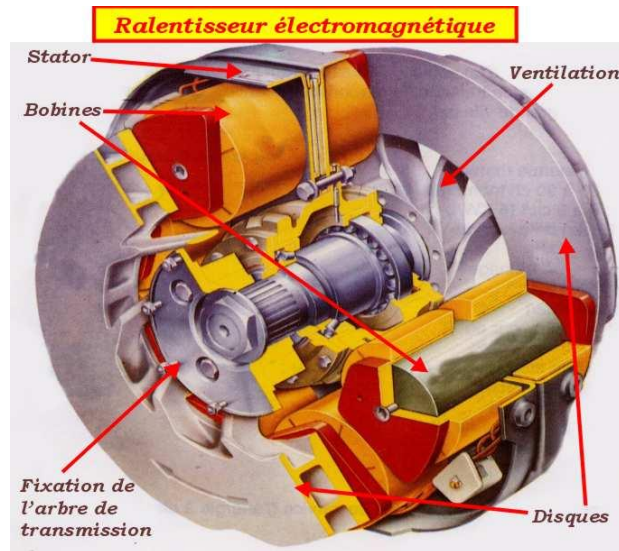


Figure 11 : Ralentisseur électromagnétique de poids lourd [30]

Il suffirait alors de récupérer cette énergie dissipée grâce à un liquide dans lequel se trouve le ralentisseur. Cette fois-ci, la cuve n'a pas forcément de géométrie à respecter, cependant, il est vital de l'isoler thermiquement. Concernant le liquide, comme expliqué dans la partie sur le frein hydraulique, l'eau semble un choix très intéressant.

Un autre type de frein à courants de foucaults est simplement la combinaison d'un stator, traversé par des tubes où se trouve le liquide, avec un rotor relié à l'éolienne. Sur le rotor, se trouvent des aimants. Il est prouvé que la disposition et le nombre d'aimants influencent, et de manière pas forcément intuitive la puissance produite : une configuration avec beaucoup d'aimants peut produire peu de couple et donc d'énergie [27]. Dans la configuration la plus efficace, on peut s'attendre à une efficacité comprise entre 96 et 98% [27].

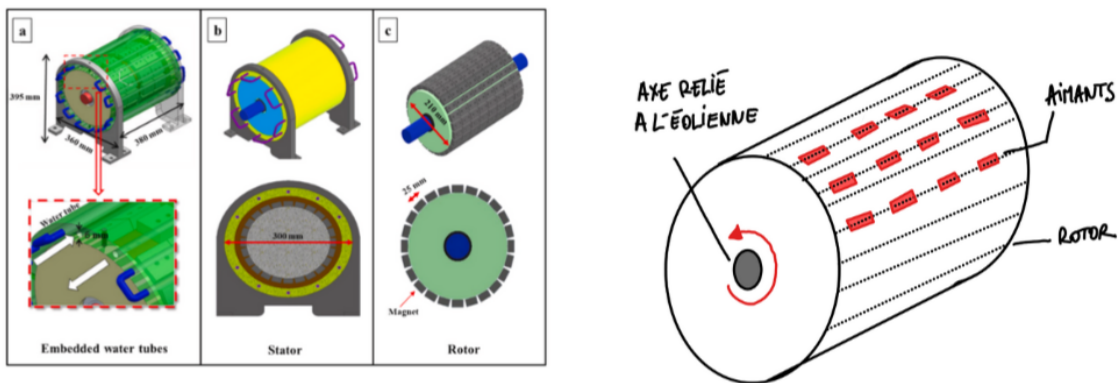


Figure 12 : Montage en rotor/stator

L'utilisation de freins à courants de foucaults est plus efficace à basse vitesse (entre 0 et 500 tr/min) que l'utilisation d'un agitateur. On peut s'attendre à quadrupler la puissance générée à 200 tr/min [19].

5. Génération de chaleur par pompe à chaleur (PAC) mécanique

Une dernière méthode afin de générer de la chaleur grâce à l'utilisation directe de la force éolienne est l'utilisation d'une pompe à chaleur mécanique. Dans ce dispositif, l'arbre de transmission de l'éolienne est directement relié au compresseur de la PAC. Étant donné qu'on est en prise directe, on évite toute perte d'énergie provoquée par un passage par l'énergie électrique, donnant ainsi un meilleur COP [16].

Il serait envisageable d'adapter ce système sur des installations de PAC déjà existantes [20], moyennant l'ajout d'une boîte de vitesses pour que la vitesse de rotation de l'axe corresponde à celle nécessaire pour le compresseur [16]. L'avantage d'utiliser ce couplage éolienne-PAC est qu'on pourrait l'utiliser comme climatiseur [20].

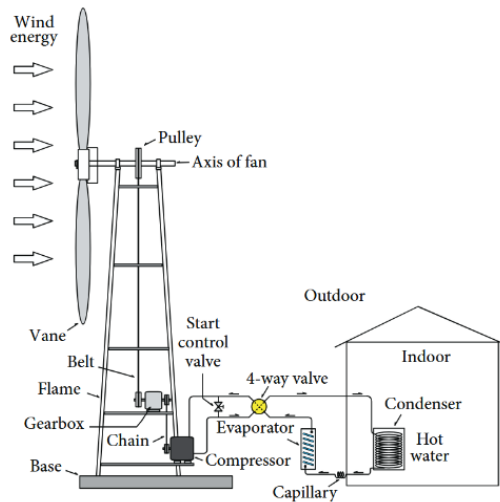


Figure 13 : Montage d'une PAC mécanique en mode été [20]

Evidemment, ce système est le moins low-tech des solutions présentées étant donné l'utilisation d'une PAC qui reste une installation très technologique et peu accessible (coût, réparations et entretien). Mais elle reste intéressante car entre 6 et 7% [29] des ménages sont déjà dotés de PAC et ce chiffre est en claire augmentation.

6. Maturité des technologies

Les trois technologies de convertisseur d'énergie thermique en énergie thermique sont toutes à des degrés de maturités différents, mais restent à des degrés encore trop faibles pour une application de masse et même une commercialisation. Pour estimer la maturité, le système de notation TRL [25] (*Technical Readiness Level*) a été utilisé dans [18] et se trouve sur la figure suivante un résumé de leur étude.

TRL		Conversion principle		
TRL	TRL definition [17]	Compression	Friction	Induction
TRL 9	Actual system operated over the full range of expected mission conditions			
TRL 8	Actual system completed and qualified through test and demonstration			
TRL 7	Full-scale, similar (prototypical) system demonstrated in relevant environment			
TRL 6	Engineering/pilot-scale, similar (prototypical) system validation in relevant environment	X		
TRL 5	Laboratory scale, similar system validation in relevant environment			
TRL 4	Component and/or system validation in laboratory environment			
TRL 3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept	X	X	X
TRL 2	Technology concept and/or application formulated	X	X	X
TRL 1	Basic principles observed and reported			

Figure : Maturité des technologies thermo-éoliennes. [18]

Cela montre l'intérêt de continuer les expérimentations sur ce domaine. Les résultats sont encourageants pour les trois types de technologies. Ce sujet reste quand même abordé par de nombreuses équipes de recherche et les papiers publiés sont en augmentation. A la date de 2022, on recense 61 papiers publiés et accessibles [18]. La recherche sur ces sujets étant encore jeune, il ne faut pas s'étonner de la faible maturité des technologies étudiées.

Bibliographie

- [1] [Expanding the horizons of power-to-heat: Cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems - ScienceDirect](#), Karl-Kiên Cao, Alejandro Nicolás Nitto, Evelyn Sperber, André Thess, 2018
- [2] [Integration of Thermal Energy Storage into Energy Network - GRIN](#), Sharyar Ahmed, 2017
- [3] [Éolien et urbanisme](#), Ministères Transition Écologique, Aménagement du Territoire, Transport, Ville et Logement, 2019
- [4] [Quelle autorisation faut-il pour installer un petit éolien chez soi](#), Nextwatt
- [5] [Rotor de Savonius — Wikipédia](#), consulté en novembre 2025
- [6] https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/113794821/Atlas_Eolien_Europeen.pdf
- [7] [Wind profile power law - Wikipedia](#), consulté en novembre 2025
- [8] [Profil logarithmique des vitesses — Wikipédia](#), consulté en novembre 2025
- [9] Eurocode 1 (EN 1991-1-3 et EN 1991-1-4)
- [10] [Wind Resource Assessment](#), Windempowerment
- [11] [Le Moulin d'Apach, au cœur du Pays des Trois Frontières \(Moselle\) – Installation d'un « Bouchotherme](#), Fédération des Moulins de France
- [12] [Experimental Study of Kinetic to Thermal Energy Conversion with Fluid Agitation for a Wind-Powered Heat Generator](#), Muhammad Haseeb Javed, Xili Duan, 2024
- [13] [Examination of Some Geometric Parameters of Impeller Power | Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development](#), R. L. Bates, P. L. Fondy, R. R. Corpstein, 1963
- [14] [Expanding the horizons of power-to-heat: Cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems - ScienceDirect](#), Karl-Kiên Cao, Alejandro Nicolás Nitto, Evelyn Sperber, André Thess, 2018
- [15] [Ralentisseur \(poids lourd\) — Wikipédia](#), consulté en novembre 2025
- [16] [Wind Powered Thermal Energy Systems \(Wtes\) A Techno - Economic Assessment Of Different Configurations](#), Alejandro Nicolás Nitto, 2016
- [17] [Experimental Study on the Heating Effect of a Wind-Energy Stirring Heater](#), Liu, X., Sun, X., Li, J. *et al.* 2021
- [18] [State of the art of Windthermal Turbines: A Systematic Scoping Review of Direct Wind-to-Heat Conversion Technologies](#), Malte Neumeier, Maximilian Cöster, Robin Adriano Marques Pais, Stefan Levedag, 2021
- [19] [Small Wind Energy System With Permanent Magnet Eddy Current Heater](#), Ion Sobor, Vasile Rachier, Andrei Chiciuc, Rodion Ciupercă, 2013
- [20] [Development of a Wind Directly Forced Heat Pump and Its Efficiency Analysis](#) Ching-Song Jwo, Zi-Jie Chien, Yen-Lin Chen, Chao-Chun Chien, 2013
- [21] [Base Informations Climatiques Météo-Bretagne](#), Association Météo Bretagne
- [22] [Le vent a-t-il tourné en Bretagne ?](#), Observatoire de l'Environnement en Bretagne
- [23] [Weather Spark](#)
- [24] [Rapport D'Evaluation Environnementale : Contrat de plan Etat-Région](#), Préfecture de la Région Bretagne
- [25] [Technology readiness level — Wikipédia](#), consulté en novembre 2025
- [26] [Concerning The Conversion Efficiency Increase Of The Available Wind Potential](#), Ion Sobor, Andrei Chiciuc, Rodion Ciupercă, Vasile Rachier, 2011

- [27] [Analysis of the Eddy current of water heating device to convert wind energy directly into heat: Case study maldo island, South Korea](#), Sina Hadadi, Sangkyun Kang, Gwangseok Park, Jang-Ho Lee 2024
- [28] [Etude aérodynamique instationnaire d'un rotor éolien de Savonius : mise en évidence de l'influence de la portance](#), Pauline BUTAUD, Aurélien BESNARD, Thibaud MARCEL, Michel MAYA, 2013
- [29] [Données sur les consommations d'énergie du secteur résidentiel](#), Ministère de la Transition Énergétique, 2023
- [30] [Ralentisseurs : les différents types](#), Comment devenir routier

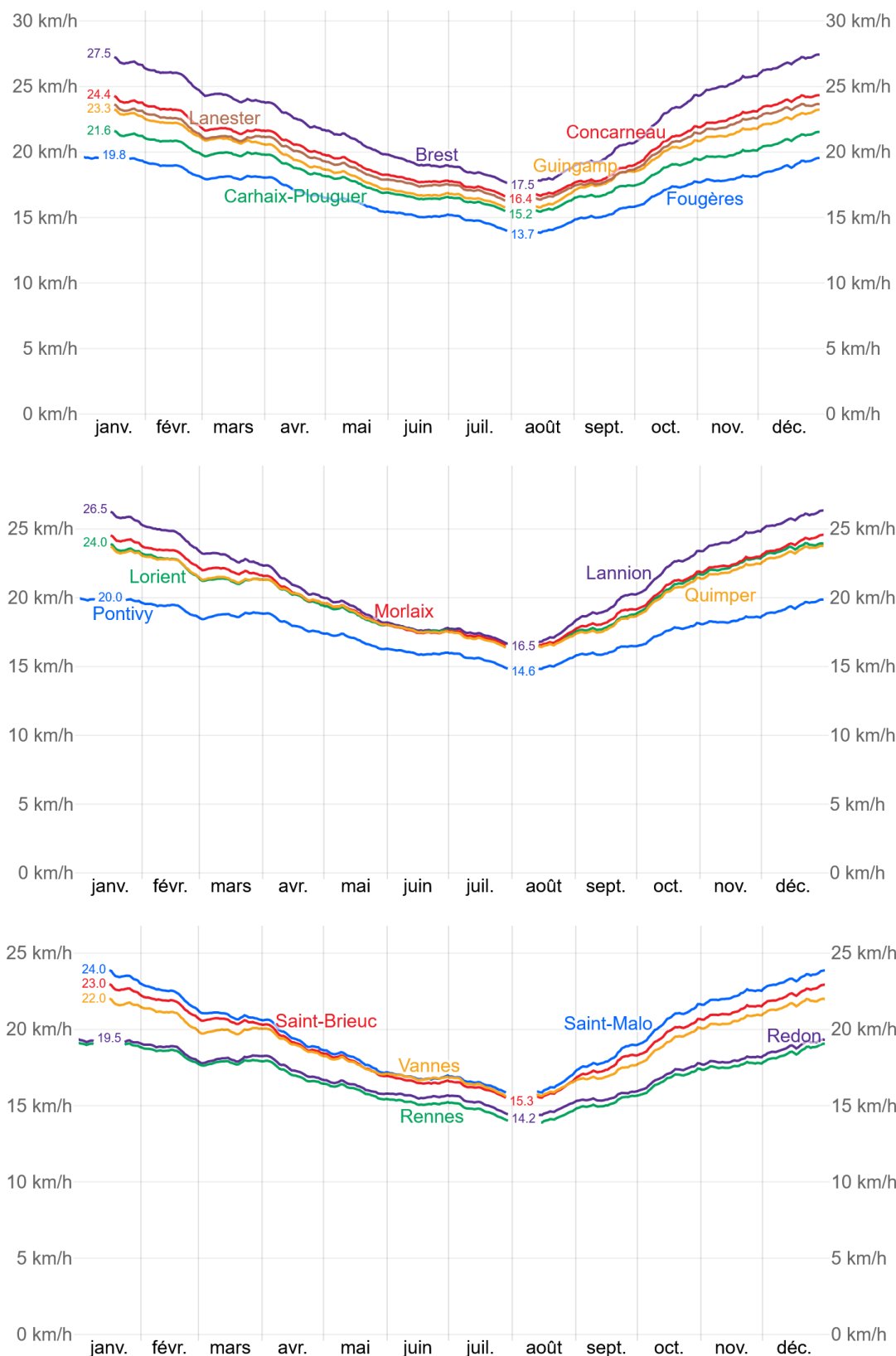
Annexes

Tableau de méthodes alternatives pour déterminer le plan de vitesse d

Type de surface	Hauteur moyenne (h)	Approximation (d)	Références principales
Mer / terrain lisse		$(d = 0)$	Garratt (1992) https://doi.org/10.1017/CBO9781316117422
Prairie / cultures basses	0.1–1 m	$(d = 0.1–0.3h)$	Wieringa (1993) https://sci-hub.se/10.1007/bf00705357
Verger / buissons clairsemés	1–5 m	$(d = 0.3–0.6h)$	Raupach (1994) https://doi.org/10.1007/BF00709229
Forêt dense	10–30 m	$(d = 0.6–0.8h)$	Stull (1988) https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8 , Garratt (1992) https://doi.org/10.1017/CBO9781316117422
Zone urbaine compacte	10–50 m	$(d = 0.7–0.9h)$	Grimmond & Oke (1999) https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%3C1262:APOUAD%3E2.0.CO;2

Vents moyens sur l'année 2024 en Bretagne pour quinze villes majeures

Les données et les graphes sont issus.es de [23]



Carte des ensembles paysagers breton

Cette cartographie est issue du rapport *Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des Territoires (SRADDET)* [24] produit par le conseil régional de Bretagne.

