



Rapport O.S.E :

Implantation d'un parc éolien offshore sur l'étang de Berre

Professeur :
G. GUERASSIMOFF

Etudiants :
Chemsî BEJJAJ
Mehdi KESSAD
Allatan TOGUEBAYE
Guillaume VAUX

A.U 2004/2005

Sommaire

<i>Avant propos</i>	3
I. Introduction et Généralités	4
1. Introduction	4
2. Principe de fonctionnement.....	5
3. L'implantation d'éoliennes	5
4. Quelques aspects techniques de l'éolien off-shore	6
5. Calcul du productible éolien français.....	8
6. Les enjeux	9
II. Etat des lieux de l'étang de Berre	10
1. Situation géographique.....	10
2. Situation socio-économique	11
3. Situation écologique :	13
4. Potentiel éolien.....	16
5. Bilan :	17
III. Elaboration du Projet	20
1. Détermination de la Zone d 'implantation	20
a. Densité et vitesse des vents	20
b. Environnement	21
c. activité industrielle	22
d. Autres facteurs de choix	23
e. Bilan	27
2. Dimensionnement du parc éolien off-shore	28
⇒ Plage d'utilisation d'une éolienne:.....	28
⇒ Choix de l'éolienne :	28
⇒ Choix de la hauteur du mât.	29
3. Raccordements	30
⇒ Simulation 1	30
⇒ Simulation 2	31
4. Estimations des coûts	32
IV. Conclusion	33

Avant propos

Dans le cadre des projets du module Optimisation des Systèmes Energétiques, nous avons à étudier la faisabilité d'implantation d'un parc éolien off-shore à Berre l'étang. Le sujet d'études se présente comme suit :

« Le site de l'étang de Berre peut être considéré comme un site favorable à l'implantation d'éoliennes off-shore. Après avoir trouvé le gisement éolien de la région, étudier la faisabilité de l'implantation d'éoliennes (ou d'une ferme éolienne) afin de satisfaire partiellement la demande d'électricité de certaines industries implantées sur le site.

On étudiera l'aspect technique de raccordement aux sites consommateurs ainsi que le raccordement au réseau. On envisagera un stockage de la production si elle ne correspond pas à la charge et on regardera si un couplage à l'hydraulique du site de la Durance est envisageable pour faire du pompage (faisabilité technique, coût, rentabilité). »

Le long de ce rapport nous allons essayé de présenter globalement l'énergie éolienne, ensuite l'état des lieux de l'étang Berre d'un point de vue potentiel éolien, puis l'étude technique de faisabilité et la possibilité de répondre partiellement à la demande locale, sachant qu'on se situe dans une zone industrielle, pour finir avec les perspectives et les possibilités de collaboration avec le site de la Durance.

Vu les contraintes de temps et de moyens, notre recherche a été basée sur les données fournies sur Internet, par les différents sites des acteurs socio-économiques de cette zone, (à citer mairie, conseil régional, EDF, Météo France...etc.)

Nous espérons que ce travail servira à l'implantation éventuelle de ce parc éolien, et qu'il pourra constituer une sorte de collecte d'informations pour les étudiants ou industriels qui veulent finaliser le projet.

Les auteurs.

I. Introduction et Généralités

1. Introduction

On estime que chaque année, le vent distribue entre 2.5 et 5.10^{15} kWh; une énergie très importante mais difficilement récupérable. C'est ce potentiel énorme que représente l'énergie éolienne qui a poussé les hommes à trouver un moyen toujours plus perfectionné pour sa transformation en énergie mécanique ou électrique.

Dans les années "60", le faible coût des autres sources d'énergie (notamment le pétrole) a dissuadé l'expansion de l'exploitation de l'énergie éolienne. En effet, pour que cette source d'énergie écologique parce que non-polluante, attractive car autonome, puisse être commercialisée, il est nécessaire qu'elle soit rentable par rapport aux autres sources d'énergie. La mise en place d'un réseau électrique national très important en France est un des facteurs pouvant expliquer le faible nombre d'éoliennes implantées.

Ainsi, dans quels cas est-il préférable d'opter pour l'énergie éolienne? Principalement lorsqu'on se situe dans une région éloignée, à l'écart du réseau électrique national, ou bien encore lorsque l'on n'a besoin que d'une relativement faible quantité d'énergie et d'une puissance fournie non régulière pour alimenter une pompe à eau par exemple?(Le problème de la non-régularité de la puissance fournie par l'aérogénérateur peut être remédié par la présence d'une batterie de stockage et/ou d'une source d'énergie secondaire qui se met en marche lorsque la batterie est vide).

Tout ceci était encore vrai au début des années "80" mais les progrès technologiques ont fait que depuis le début des années "90", les perspectives d'exploitation de l'énergie éolienne sont complètement différentes. En effet, même si le coût actuel de l'électricité éolienne dépasse encore d'au moins 20% celui de l'énergie conventionnelle, en comptant avec une érosion continue du prix des machines (moins 20% dans les trois dernières années), de celui de l'installation, de la puissance et de l'efficacité sans cesse croissante des machines éoliennes, on peut envisager un coût du kilowattheure compétitif dans peu de temps. Pour donner une idée des énormes progrès réalisés, pour des vents moyens de 23 km/h, le prix du kWh a chuté de 50 à 29 centimes au Danemark depuis 1990 et la puissance moyenne des machines est passée de 30 kW en 1983 à 600 kW en 1997. Tous ces bouleversements techniques font que ce secteur est actuellement en pleine expansion et que s'ouvre à lui une multitude de marchés mondiaux. En effet, en cinq ans, le marché annuel mondial a plus que quadruplé pour atteindre 1566 mégawatts en 1997 (l'Europe représente 84% du marché), et BTM Consult, société d'études spécialiste du secteur, table sur une croissance de la demande mondiale de 18% par an jusqu'en 2002.

Ainsi, l'énergie éolienne est vouée à un bel avenir puisque certains spécialistes du secteur estiment que techniquement, le réseau électrique national peut s'équiper jusqu'à 20% en énergie éolienne. Cependant, toutes les éoliennes ne ressemblent pas à celles de plusieurs centaines de kilowatts qui servent à produire de l'énergie électrique. Il existe une multitude d'éoliennes.

2. Principe de fonctionnement

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique. La puissance récupérable par une éolienne est fonction du carré de son diamètre et du cube de la vitesse du vent, comme le montre la formule suivante : $P = 1/2 (\rho)AV^3 C_p$

avec :

ρ : densité volumique de l'air (1,225 kg/m³ à 15°C et 1013 mbar)

A : surface balayée par le rotor (m²)

V : vitesse du vent (m/s)

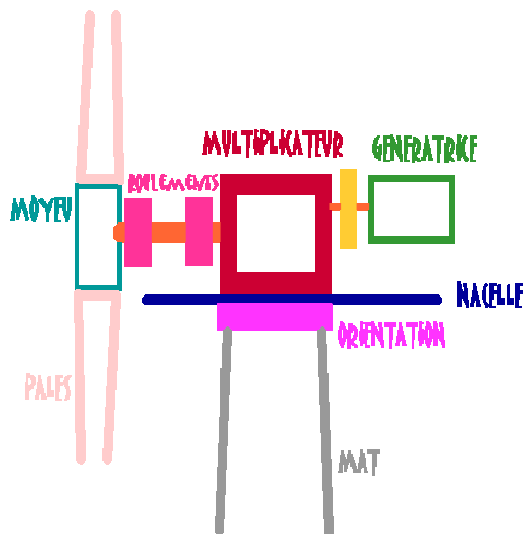
C_p : coefficient de performance (sans unité)

La théorie montre que C_p dépend des caractéristiques de la pale, mais il faut aussi y ajouter les rendements des différents composants (génératrice, multiplicateur). L'histoire a montré que les praticiens l'emportent sur les théoriciens dans le domaine de l'éolien... Pour le potentiel éolien, il existe des cartes...

Technologie

Une éolienne moderne contemporaine est un système constitué des sous-systèmes suivants :

- * **le rotor**, avec des pales montées sur un moyeu
- * la **transmission mécanique**, qui transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge
- * une **génératrice électrique**, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique
- * une **nacelle**, qui supporte le rotor, la transmission et la génératrice
- * un **système d'orientation**, qui oriente la nacelle face au vent
- * un **mât**, qui supporte la nacelle
- * un **système électrique**, qui gère la connexion au réseau et le fonctionnement de l'éolienne .



3. L'implantation d'éoliennes

L'implantation d'éoliennes est une opération complexe mettant en jeu de nombreux paramètres à la fois techniques, sociaux et environnementaux. La recherche de sites sur une zone géographique déterminée comprend l'analyse du gisement éolien, mais aussi l'identification des contraintes techniques (distance au réseau, servitudes publiques, accès...), environnementales (paysage, zones naturelles protégées, impact sonore...) et socio-économiques (activités économiques, propriété foncière...).

Le développement d'un site éolien peut se résumer en 3 phases :

✓ Phase 1 : repérage et identification du site

Cette première phase est empirique, souvent hasardeuse. Il s'agit de repérer un site potentiellement intéressant pour l'installation d'éoliennes et d'identifier les contraintes potentielles qui limiteront le développement ultérieur.

✓ Phase 2 : mesure du potentiel éolien

Cette phase est plus technique : il s'agit d'installer un mât de mesure, souvent de 40 mètres de hauteur, et de mesurer le vent à différentes hauteurs. Après recalage des données, on obtient une évaluation fine du potentiel éolien.

✓ Phase 3 : montage d'un projet

C'est la phase finale de développement : à l'issue de cette phase, le projet est concret, les éoliennes choisies et implantées, le budget détaillé...

Et ceci ne veut pas dire pour autant que le projet éolien sera effectivement construit... Il faut encore trouver des investisseurs, obtenir le permis de construire, avoir une convention d'achat de l'électricité produite, entre autre.

4. Quelques aspects techniques de l'éolien off-shore

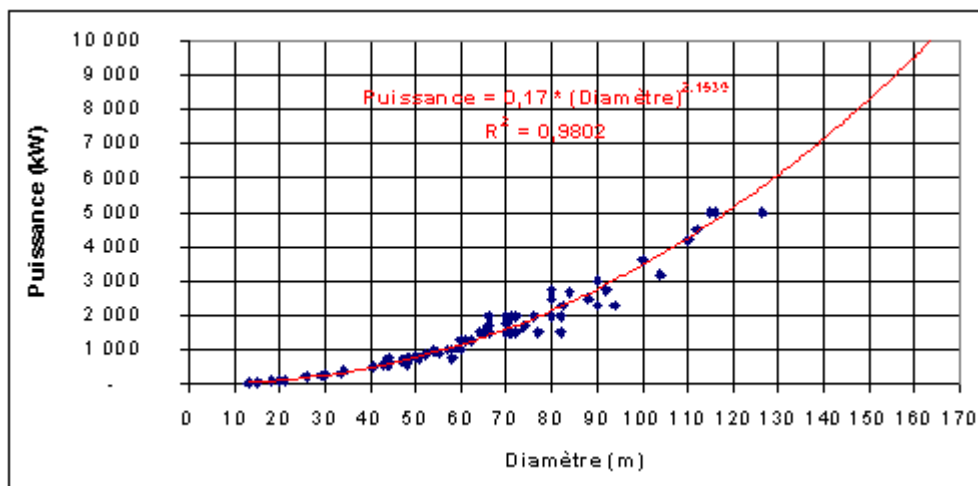
Le couple profondeur/distance à la côte

Toutes les centrales éoliennes offshore se trouvent dans des profondeurs d'eau de moins de 20 mètres et à des distances à la côte inférieures à 18 km . Différents projets en développement se situent dans des profondeurs supérieures à 20 mètres et à des distances souvent supérieures aux 12 milles nautiques (limite de souveraineté du pays).

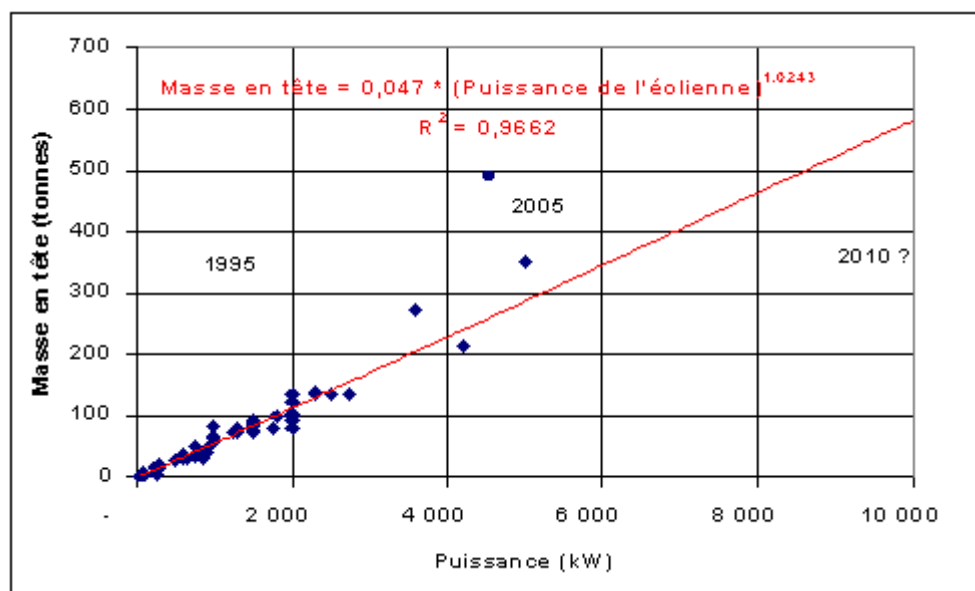
La taille des éoliennes

En théorie, rien ne s'oppose à l'augmentation de la puissance et donc du diamètre des diamètre des futures éoliennes offshore. En extrapolant (voir graphique ci-dessous), on peut s'attendre à des éoliennes de plus de 160 m de diamètre de puissance unitaire de 10 MW.

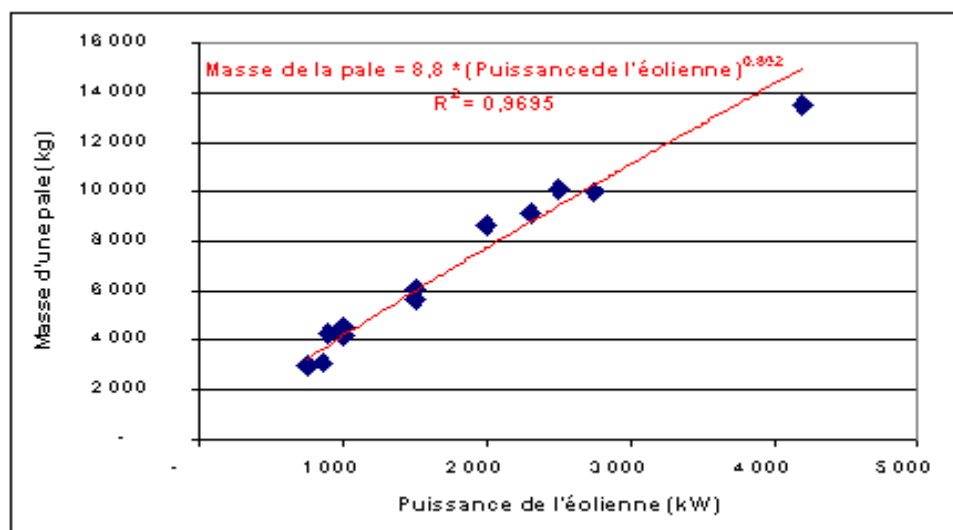
Certains projets sont déjà dans les cartons... pour 2010 ?



La grande question, ce sont les fondations qui dépendent certes de la profondeur d'eau, mais aussi de la masse en tête (nacelle + pales), qui induit des efforts dynamiques proportionnels. Si l'on interpole la tendance actuelle, on obtient quelques 600 tonnes pour une éolienne de 10 MW (voir graphique ci-dessous). Mais cette tendance linéaire (masse en tête proportionnelle à la puissance) devrait s'infléchir vers des masses plus faibles : on le constate avec Vestas et Neg-Micon.



La masse de la pale suit la même tendance que la masse en tête. Là encore, il va falloir optimiser les profils, rendre la pale flexible, voire même changer radicalement de technologie (et se rapprocher de celle des ailes d'avion ?).



5. Calcul du productible éolien français

Le calcul qui suit vise à évaluer le potentiel éolien pratiquement récupérable en France métropolitaine, en tenant compte des contraintes techniques et environnementales.

En prenant les hypothèses suivantes :

- éolienne terrestre
 - 1,5 MW, 70 m de diamètre à 60 m de hauteur (éolienne commerciale disponible)
 - distance entre éoliennes : 6 D, soit 420 m
 - densité de puissance installable : 8 MW par km²
- éolienne en mer
 - 5 MW, 110 m de diamètre à 90 m de hauteur (en cours de développement : Enercon E112, Neg-Micon) Voir technologie offshore
 - distance entre éoliennes : 7 D, soit 770 m
 - densité de puissance : 8 MW/km²
- découpage géographique et physique
 - 3 grandes régions : Grand Nord-Ouest (1 740 km de littoral du Nord à la Charente Maritime), Grand Sud (départements avec littoral, 42 650 km²), Grand Centre (départements du Centre/Sud/Sud-Ouest sans littoral, 30 000 km²).
 - Hors régions très spécifiques (Alpes, Pyrénées centrales).
 - 3 zones de potentiel éolien : 2 000, 2 500 et 3 000 kWh/m² de surface balayée. Sur la base de l'analyse CSTB et de l'Atlas Eolien Européen.
- utilisation du sol
 - sites terrestres :
 - 3 à 5% du territoire agricole suivant les régions (de fait, les éoliennes ne mobilisent réellement que 2% maximum de cette surface : le reste de la surface est toujours cultivable ou pâturable). Les sites du Sud autorisent des densités de puissance plus fortes (vents très directionnels permettant d'aligner 7,5 MW sur 1,3 km comme à Sallèles-Limousis), mais les pourcentages d'utilisation du sol sont limités par l'impact visuel (crêtes très visibles).
 - limitation à la bande comprise entre 0 et 10 km de la côte pour les éoliennes terrestres sur la côte Atlantique/Manche/Mer du Nord (hors Bretagne où des sites collinaires intérieurs sont utilisables).
 - sites en mer :
 - 1 à 3,5% de la surface de la mer suivant les régions et 0,2% pour les régions de la Méditerranée du Sud-Est.
 - limitation à la bande comprise entre 10 et 20 km de la côte pour les éoliennes en mer, entre 0 et 10 km pour les éoliennes terrestres sur la côte Atlantique/Manche/Mer du Nord.
 - Les résultats globaux sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	Puissance MW	Energie TWh/an	Nombre
Les sites terrestres	11 197	29,469	7 466
Les sites en mer	6 465	21,661	1 292
Total :	17 662	51 130	8 758

6. Les enjeux

Le marché de l'énergie éolienne est en forte de croissance. Les enjeux industriels des éoliennes apparaissent clairement à la lecture du tableau de structure des coûts d'un projet de centrale éolienne :

LE BUDGET D'UN PROJET EOLIEN	
Eoliennes	75%
Génie Civil	8%
Electricité	10%
Levage/Transport	2%
Ingénierie	5%
Total :	100.0%

On constate que les 3/4 des coûts sont liés à l'éolienne elle-même. En prenant un coût moyen du MW installé de 7 MF, les éoliennes représentent donc environ 5 MF par MW. La structure des coûts de l'éolienne elle-même est détaillée dans le tableau ci-dessous.

COMPOSANTS	% (en valeur)
Pales	14 %
Moyeu	3 %
Multiplicateur	14 %
Génératrice	8 %
Roulements	4 %
Groupe hydraulique	8 %
Electricité	9 %
Nacelle et capot	8 %
Assemblage	3 %
Divers	5 %
Mât	24 %
Total :	100.0%

Tous ces composants font appel à des technologies connues et éprouvées pouvant donc être réalisés en France. Ceci représente un potentiel de développement économique, et de création d'emploi, non négligeable. A noter que dans les années 60, la **France** était au **premier rang** dans le domaine...

II. Etat des lieux de l'étang de Berre

Comme il a été indiqué dans la partie des généralités, la première étape de l'implantation d'un parc éolien est de repérer la zone d'installation, ce qui revient à étudier sa situation géographique, le potentiel éolien, les impacts socio-économique et environnementale.

L'implantation d'éoliennes doit en effet satisfaire de nombreux critères techniques, économiques, réglementaires, paysagers, et faire l'objet d'un travail de partenariat et de concertation locale.

1. Situation géographique

L'Étang de Berre se situe entre la Durance au nord et la Méditerranée au sud, le Rhône à l'ouest et les villes d'Aix et de Marseille à l'est. Cet étang, qui est alimenté naturellement par trois petits cours d'eau, est relié de manière artificielle avec la Méditerranée grâce au Canal de Caronte construit à partir de 1863. Aujourd'hui, il est également alimenté artificiellement en eau douce depuis 1966 par un canal usinier EDF provenant de l'usine hydroélectrique de Saint-Chamas.



L'Étang de Berre en chiffres :

Surface totale : 155 Km²

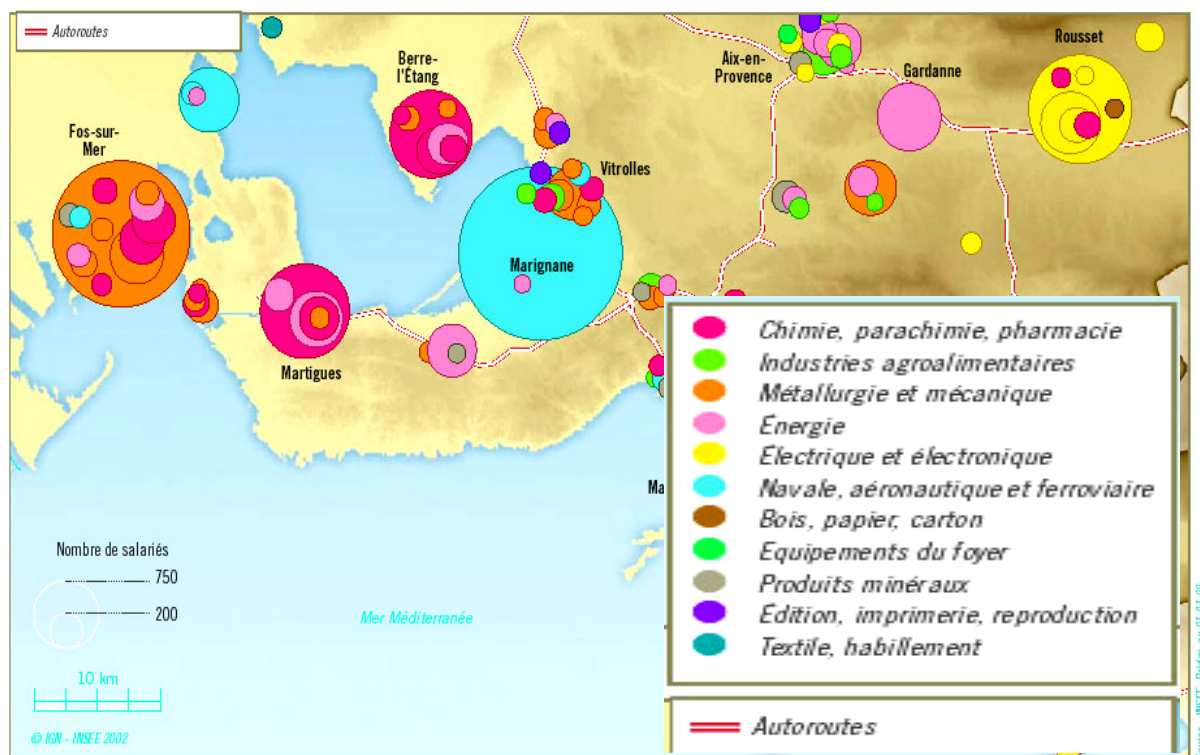
Profondeur moyenne : 6 m

Profondeur maximale : 9,5m

Volume d'eau : 980 millions de m³

2. Situation socio-économique

On peut remarquer sur la carte suivante la distribution des activités industrielles et leurs natures autour de l'étang :



Les industries pétrochimiques et sidérurgiques, ainsi que l'activité navale, avec la présence de deux aéroports : Marignane et Fos sur mer, dominent autour de l'étang.

Si la dense présence industrielle dans cette zone offre une importante infrastructure, les servitudes aéronautiques de dégagement nous mettent face à d'autres contraintes. Elles correspondent à l'emprise des servitudes aéronautiques de dégagement liées à l'arrêté du 31 décembre 1984. L'implantation d'éoliennes dans ces zones est peu probable, car la hauteur de celles-ci dépasserait généralement la cote de la servitude.

Les espaces contrôlés et axes de vol Ces zones sont liées à l'activité de chaque plate-forme. Ces secteurs comprennent également les axes de vol. L'implantation d'éoliennes à l'intérieur de ces zones n'est pas impossible, mais sera soumise à étude.

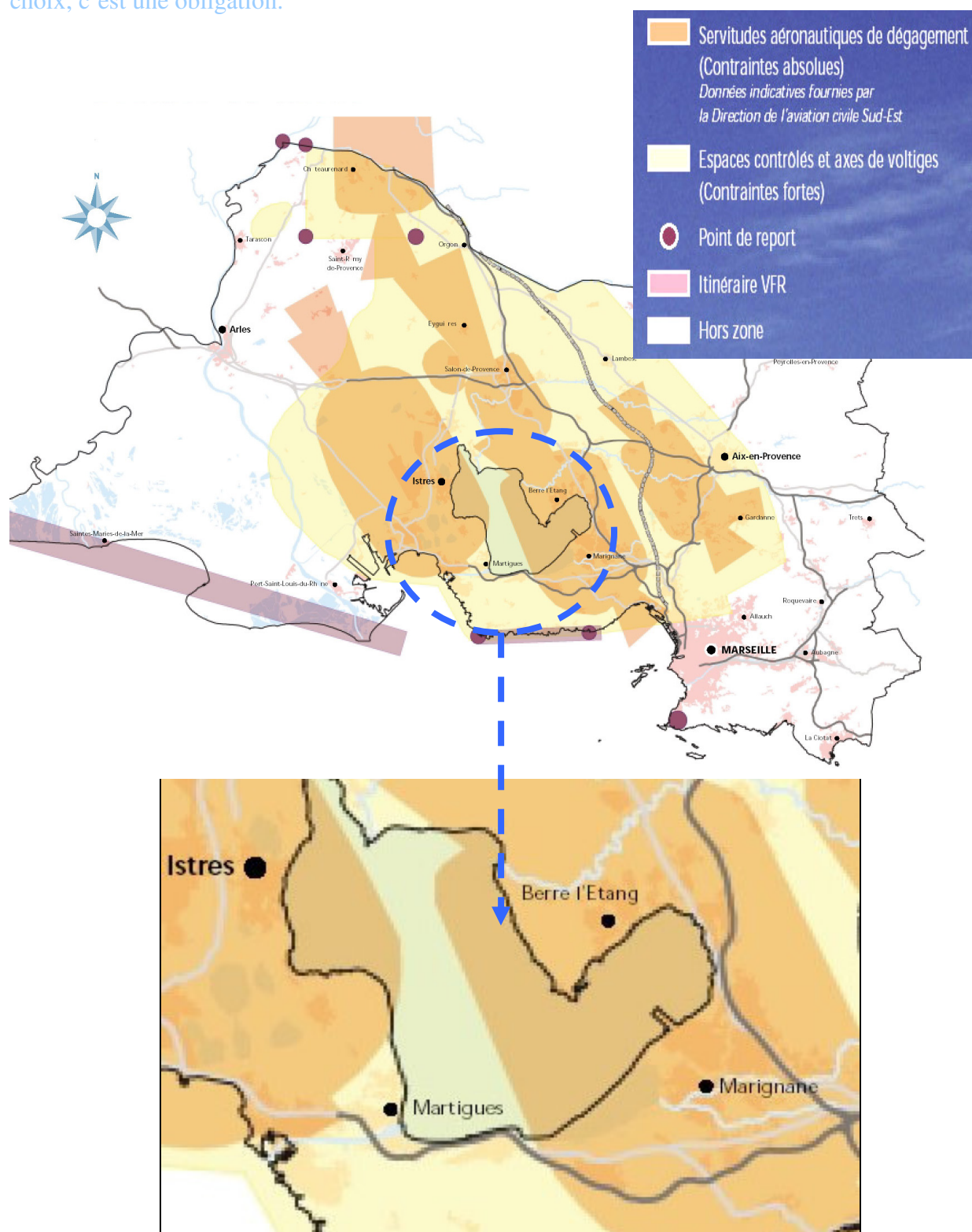
Le point de report - itinéraire VFR (vol à vue) Ces points sont liés aux cheminements au sein d'une CTR (zone de contrôle d'aérodrome), ou situés sur des itinéraires VFR (vol à vue). L'implantation d'éoliennes à proximité de ces points ou sur les itinéraires concernés n'est pas compatible avec l'activité aérienne liée à l'aviation générale.

Hors ces zones les contraintes sont faibles, mais cela n'exclut pas une consultation auprès des autorités aéronautiques civiles et militaires..

Comme peut le montrer la carte (page suivante), On distingue, ainsi, des contraintes absolues et d'autres fortes, exigées par la direction de l'aviation civile.

Pour l'impact sur les habitants, la population est partagée entre deux positions, vue que le site est parmi les plus pollués en France, une pollution (visuelle principalement) en plus n'est pas la bienvenue, reste à estimer à quel point celle-ci est gênante. La deuxième position c'est comme l'énergie éolienne est une énergie propre, ceci pourra limiter considérablement les émissions de gazes polluants.

Le rôle de la communication sera déterminant ainsi que la mobilisation des politiques, dirigeants et députés, les mentalités changent, la protection de l'environnement n'est plus un choix, c'est une obligation.



3. Situation écologique :

En examinant la situation écologique de l'étang, on découvre des contradictions flagrantes, d'une part c'est une des régions les plus polluée de France et d'autre part elle contient des zones et des parcs de protection de la faune et la flore.

On distingue deux zones :

➤ Les zones Natura 2000 :

Elle ne sont pas des "sanctuaires de nature" ni des zones de protection. Sur chaque site, des objectifs de gestion sont définis et contractualisés avec les exploitants ou propriétaires pour mettre en oeuvre et concilier le développement et l'exploitation de la zone avec la protection des milieux et des espèces. Cependant, il convient d'éviter que les zones sélectionnées par l'Europe pour préserver des milieux et espèces soient dégradées irrémédiablement.

Pour disposer des données les plus récentes sur le réseau Natura 2000 en Provence-Alpes- Côte d'Azur, consulter le site de la DIREN : <http://www.paca.ecologie.gouv.fr/>

➤ Zones d'inventaire :

Les zones d'inventaire, c'est-à-dire les ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Floristique ou Faunistique) et les sites éligibles, n'ont pas d'effet en terme réglementaire strictement. La présence d'un projet éolien dans une ZNIEFF ou un site éligible doit conduire à un approfondissement de l'étude d'impact par rapport aux espèces, habitats ou biotope qui y sont recensés.

Un rapprochement avec le milieu scientifique et des investigations complémentaires sont recommandés.

Les deux cartes suivantes montrent les positions de ces différentes zones.

Complément d'information :

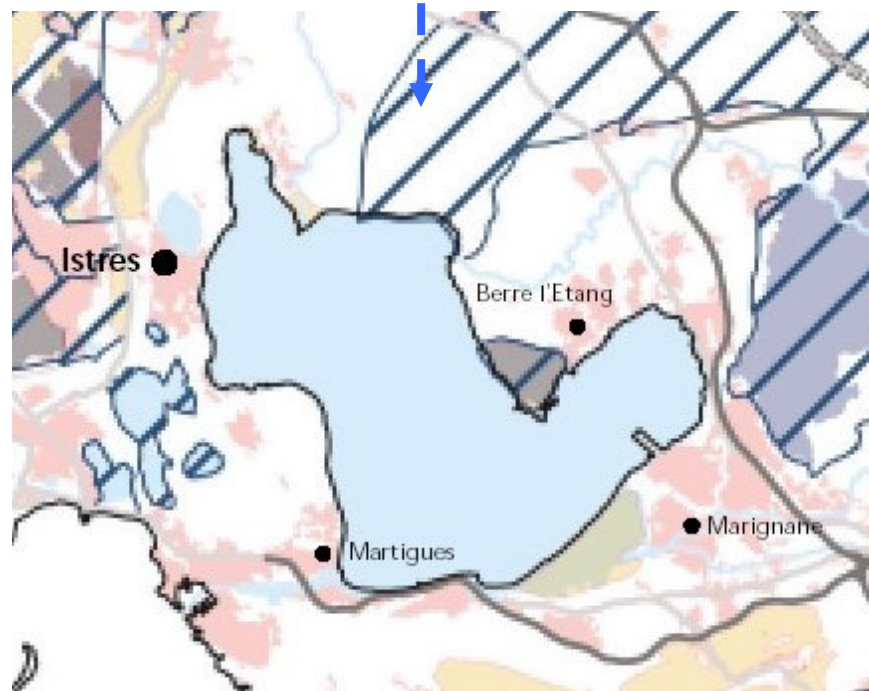
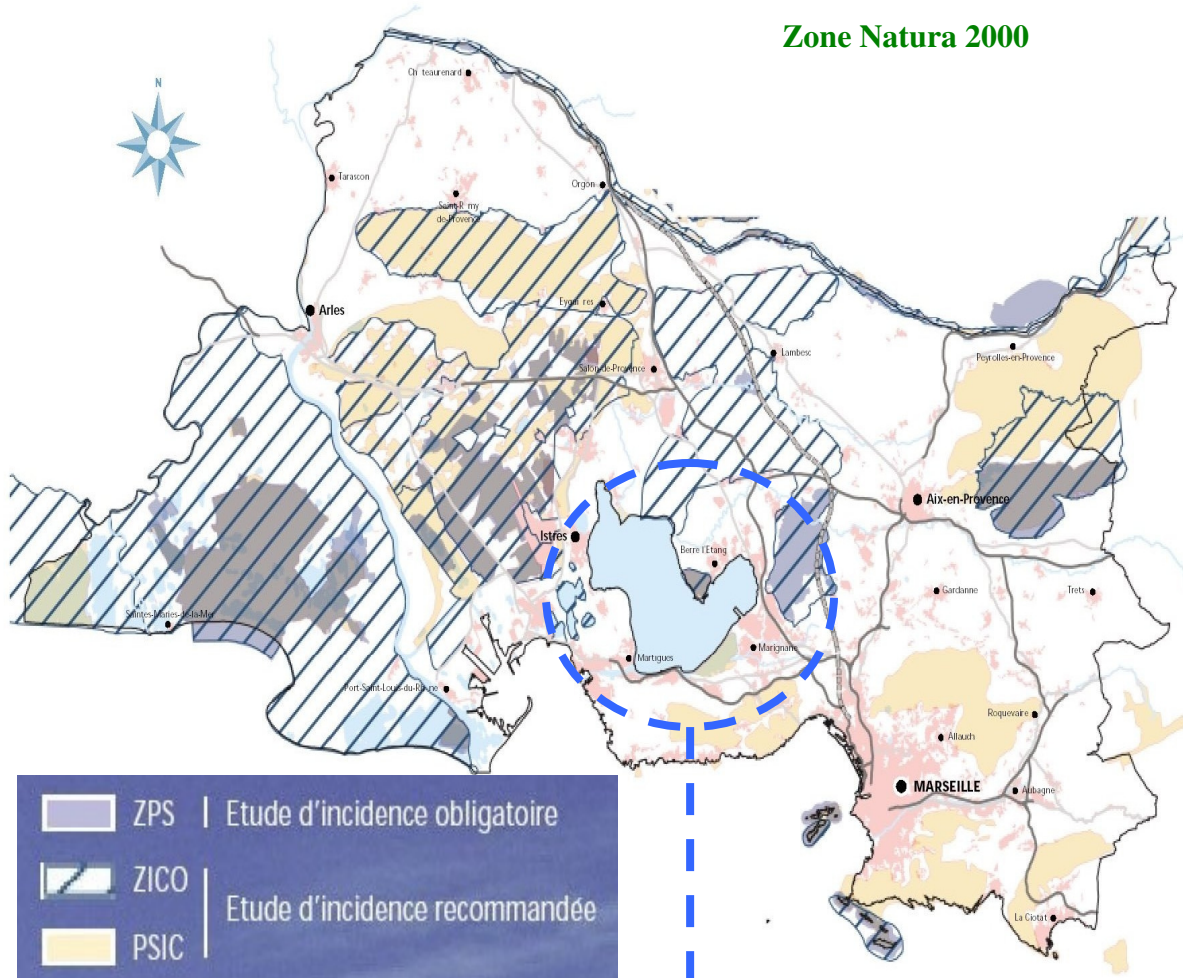
L'inventaire ZNIEFF est un inventaire national établi à l'initiative et sous le contrôle du Ministère chargé de l'Environnement. Il constitue un outil de connaissance du patrimoine naturel de la France. L'inventaire identifie, localise et décrit les territoires d'intérêt patrimonial pour les espèces vivantes et les habitats. Il organise le recueil et la gestion de nombreuses données sur les milieux naturels, la faune et la flore. La validation scientifique des travaux est confiée au Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel et au Muséum National d'Histoire Naturelle. L'inventaire ZNIEFF est un outil de connaissance. Il ne constitue pas une mesure de protection juridique directe.

Une ZNIEFF est un secteur du territoire particulièrement intéressant sur le plan écologique, participant au maintien des grands équilibres naturels ou constituant le milieu de vie d'espèces animales et végétales rares, caractéristiques du patrimoine naturel régional. On distingue deux types de ZNIEFF :

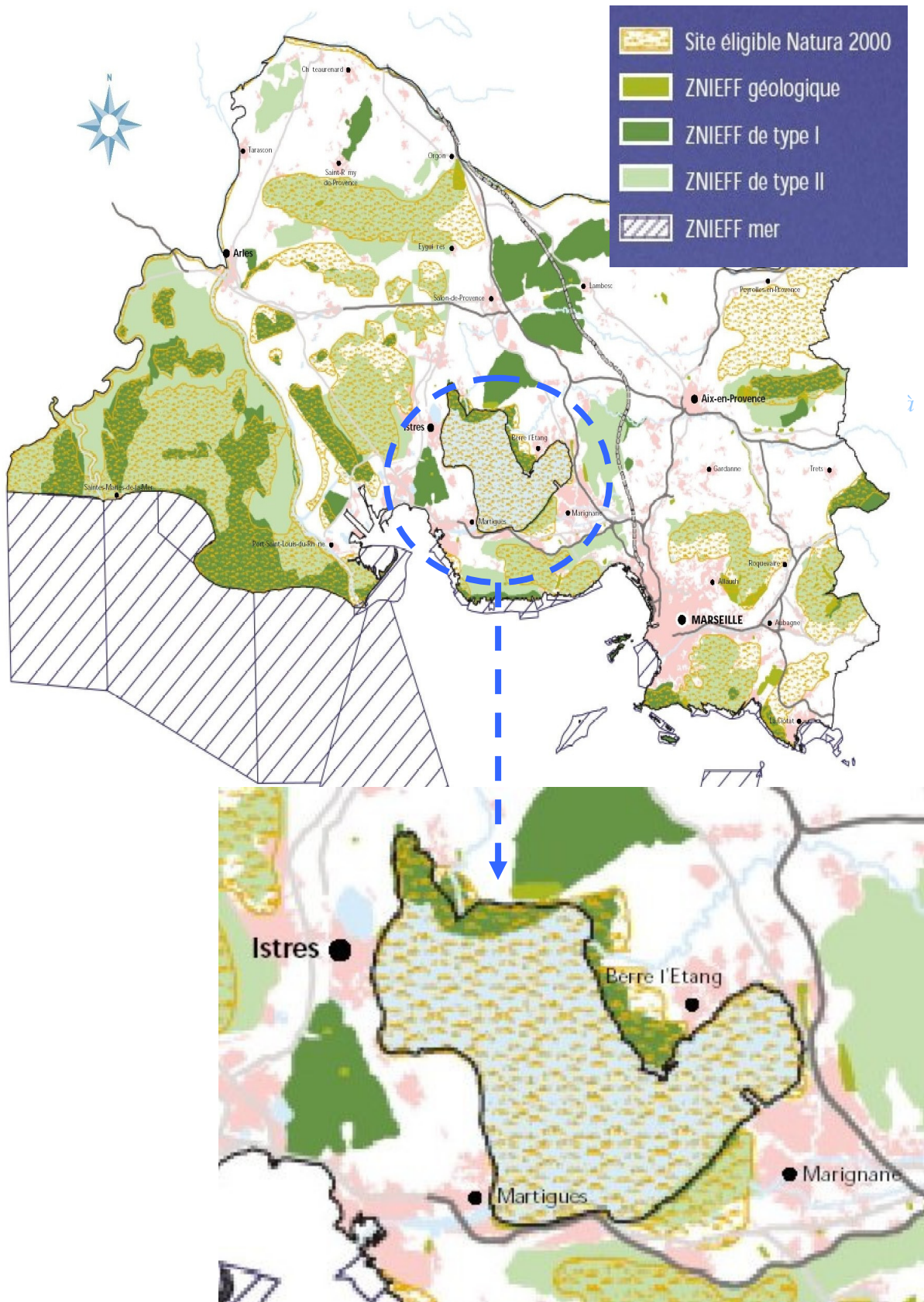
- les ZNIEFF de type I, d'une superficie généralement limitée, définies par la présence d'espèces, d'associations d'espèces ou de milieux rares, remarquables ou caractéristiques du patrimoine naturel national ou régional ;

- les ZNIEFF de type II qui sont des grands ensembles naturels riches et peu modifiés, ou qui offrent des potentialités biologiques importantes. Les zones de type II peuvent inclure une ou plusieurs zones de type I.

Zone Natura 2000



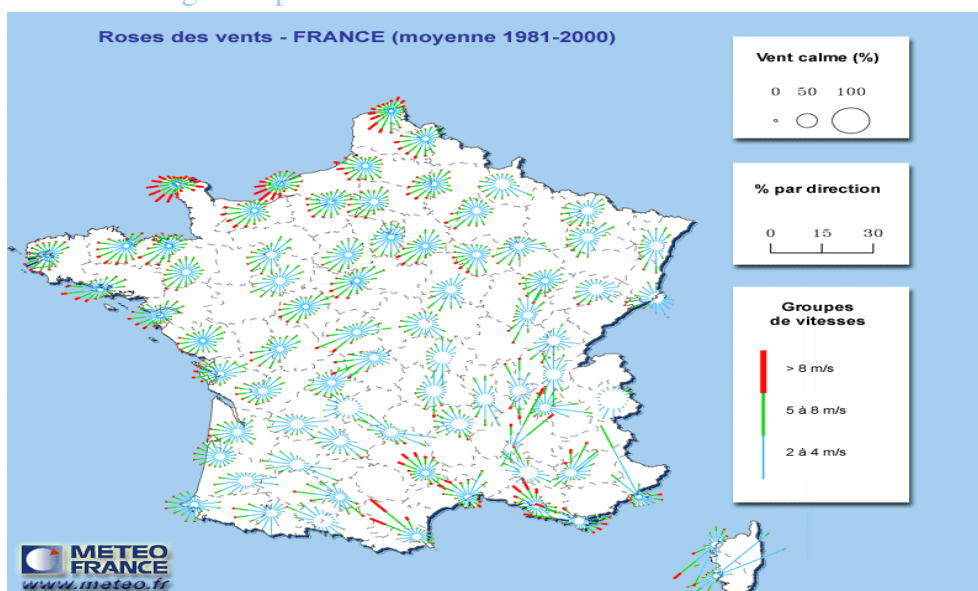
Zone d'inventaire ZNIEFF



4. Potentiel éolien

Le vent est le moteur principal de l'éolien, la mesure de son potentiel est un facteur important pour l'implantation d'un parc éolien.

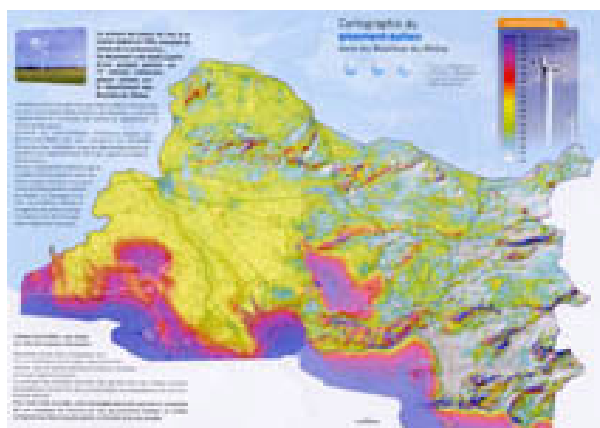
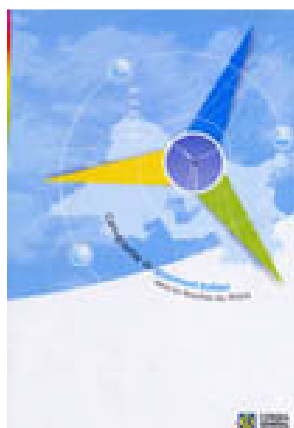
Pour cela nous avons cherché la carte des roses des vents qui donnent les vitesses moyennes dans les différentes directions. la carte suivante permet de savoir que la région de notre étude à une vitesse moyenne au dessus du seuil de rentabilité d'une éolienne estimé à 6m/s selon la technologie adoptée.



Le recensement, de la cartographie du gisement éolien au niveau de la surface de l'étang de Berre n'est pas disponible sur Internet. Nous n'avons pas réussi à l'avoir, mais nous savons que des partenaires potentiels tels le conseil régional Bouches –du –Rhône, Espace Eolien Développement et le GERES (association des énergies renouvelables). sont capables de fournir des documents plus précis.



Le document suivant, réactualisé dans sa présentation, est issu d'un travail réalisé en 1996. Il a été établi à partir d'une analyse portant sur 17 stations météorologiques situées sur le département des Bouches-du-Rhône.



Cette cartographie permet de connaître en tout point la vitesse moyenne du vent et de simuler la production de différents types d'éoliennes faisant ainsi apparaître les zones les plus favorables pour l'installation d'éoliennes, hors contraintes environnementales et techniques.

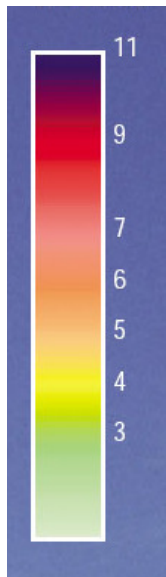
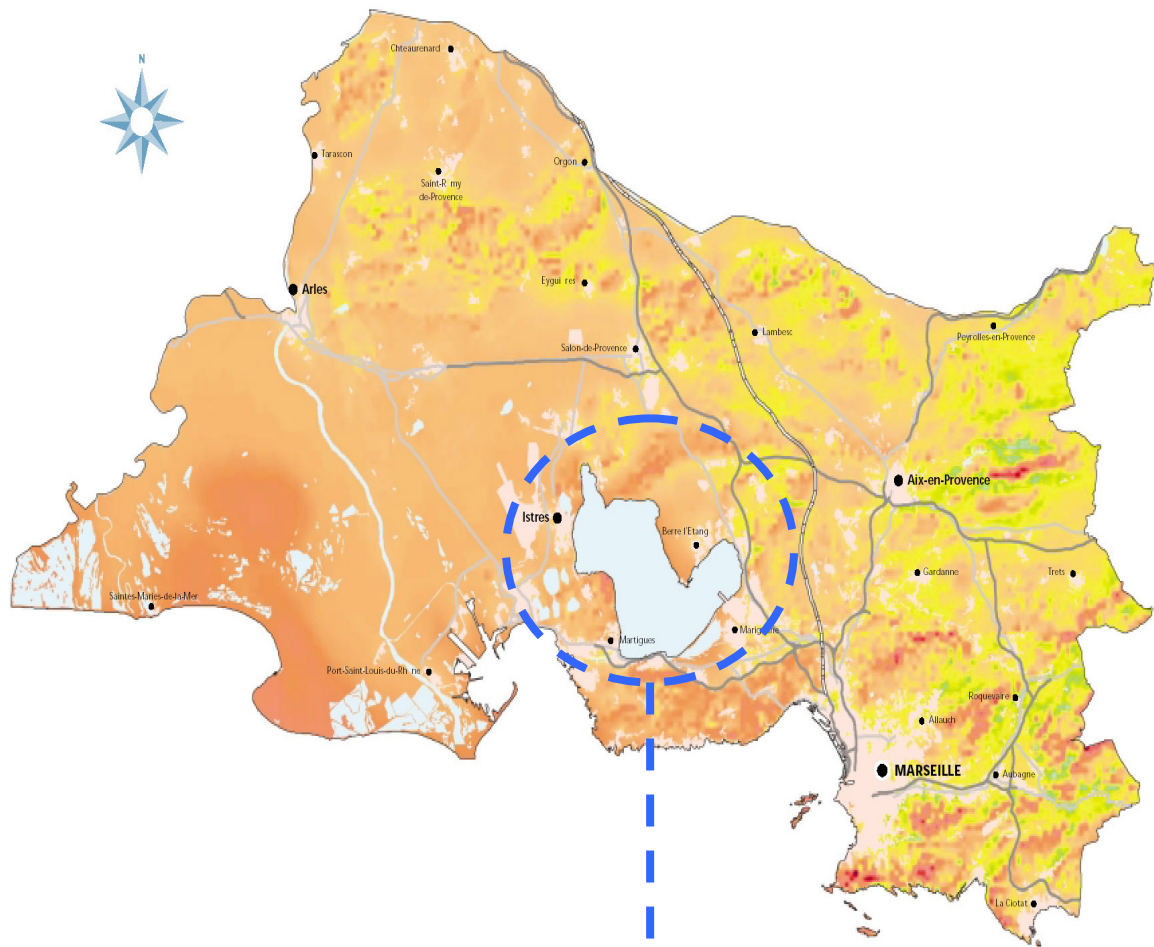
Et comme le potentiel éolien dépend de la vitesse et de la densité du vent, les deux cartes suivante peuvent l'illustrer.

Nous avons remarqué que la vitesse moyenne annuelle autour de l'étang est généralement supérieur à 6m/s, le potentiel de la densité du vent avoisine les 400 W/m². Ces valeurs nous semble largement exploitable en vue des technologies éoliennes utilisées.

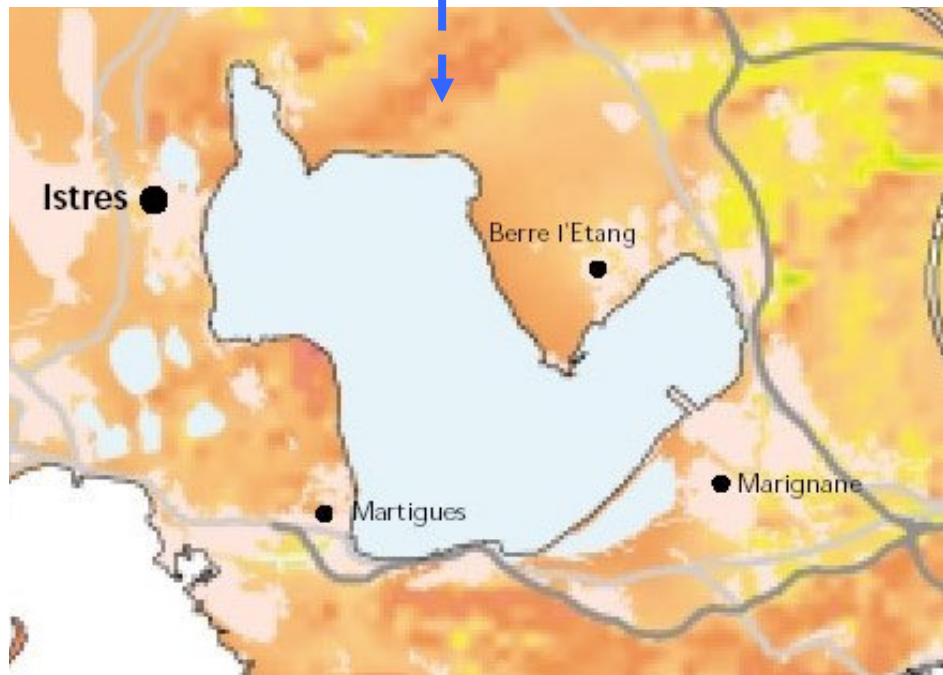
5. Bilan :

En conclusion de cette étude, Le site de l'étang de Berre peut être considéré comme un site favorable à l'implantation d'éoliennes off-shore. Certes les contraintes évoquées limitent le champ d'implantation, mais le potentiel éolien considérable permet d'augmenter le seuil de rentabilité.

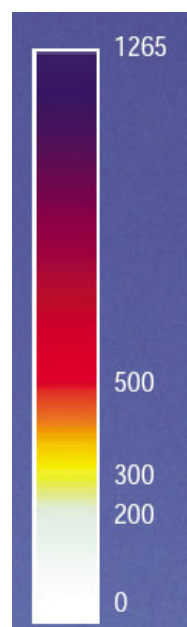
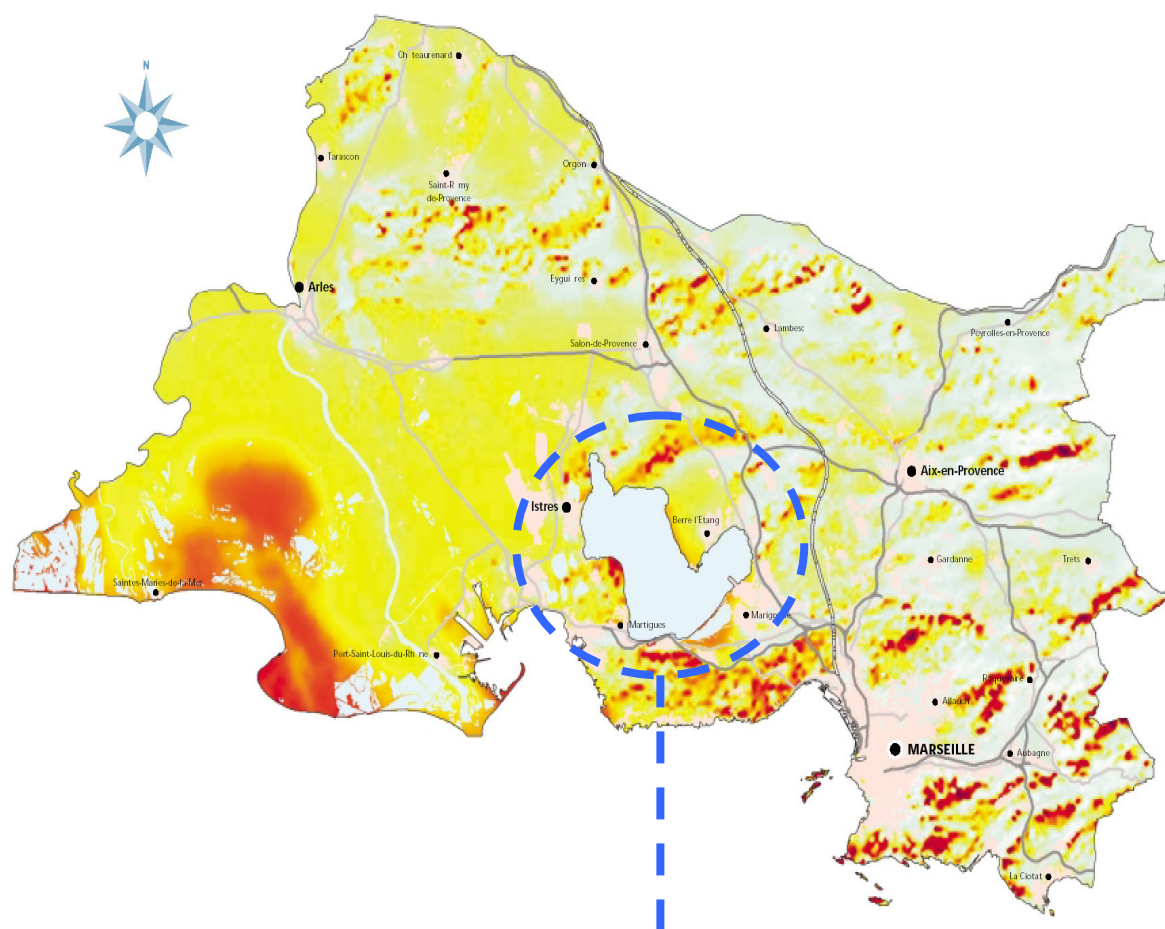
Potentiel de vitesse du vent



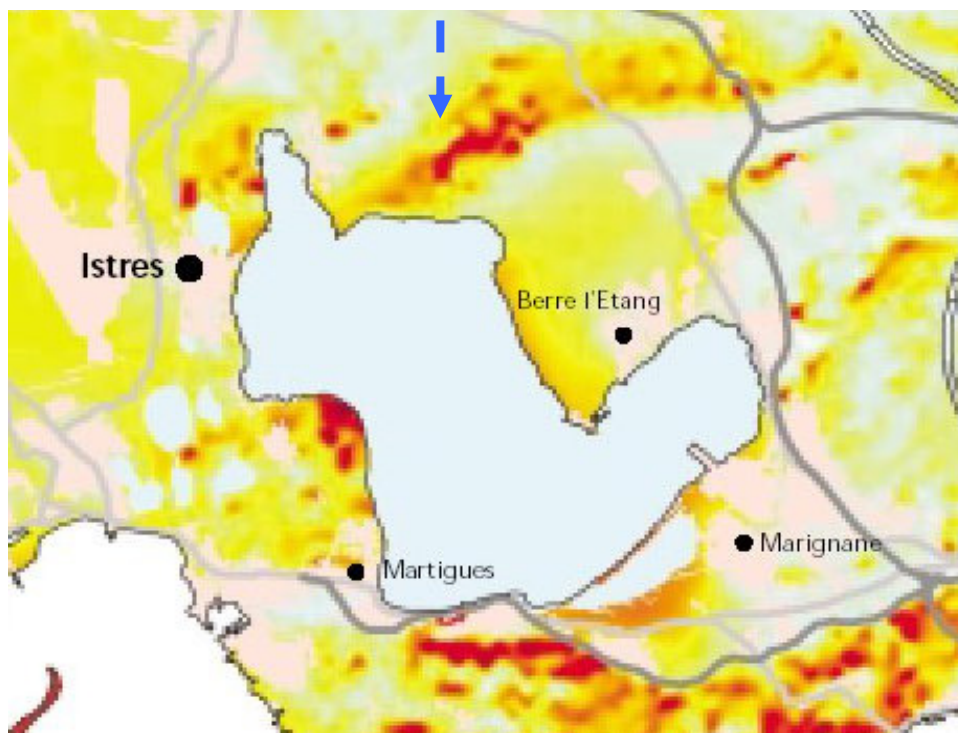
En m/s
(à 30 m du sol)



Potentiel de densité du vent



En W/m^2
(à 30 m du sol)



III. Elaboration du Projet

1. Détermination de la Zone d 'implantation

Suite à l'état des lieux effectué dans la seconde partie, il y a certaines zones où l'implantation d'un parc éolien off-shore est possible.

Afin de déterminer le site le plus adéquate, il a fallu prendre en considération tout un ensemble de contraintes vis-à-vis de la densité et de la vitesse des vents, de l'environnement, de l'activité industrielle et, bien sûr de, de la catégorie d'éolienne que l'on pourrait implanter.

a. Densité et vitesse des vents

L'Ouest, le Nord et le Sud-Ouest de l'étang de Berre sont les zones les plus appropriées pour l'implantation du parc éolien.

Le schéma ci-dessous (dont nous n'avons pas pu avoir de meilleure résolution) représente les mesures de la « **Cartographie du gisement éolien dans les Bouches du Rhône** »



Mettre légende

b. Environnement

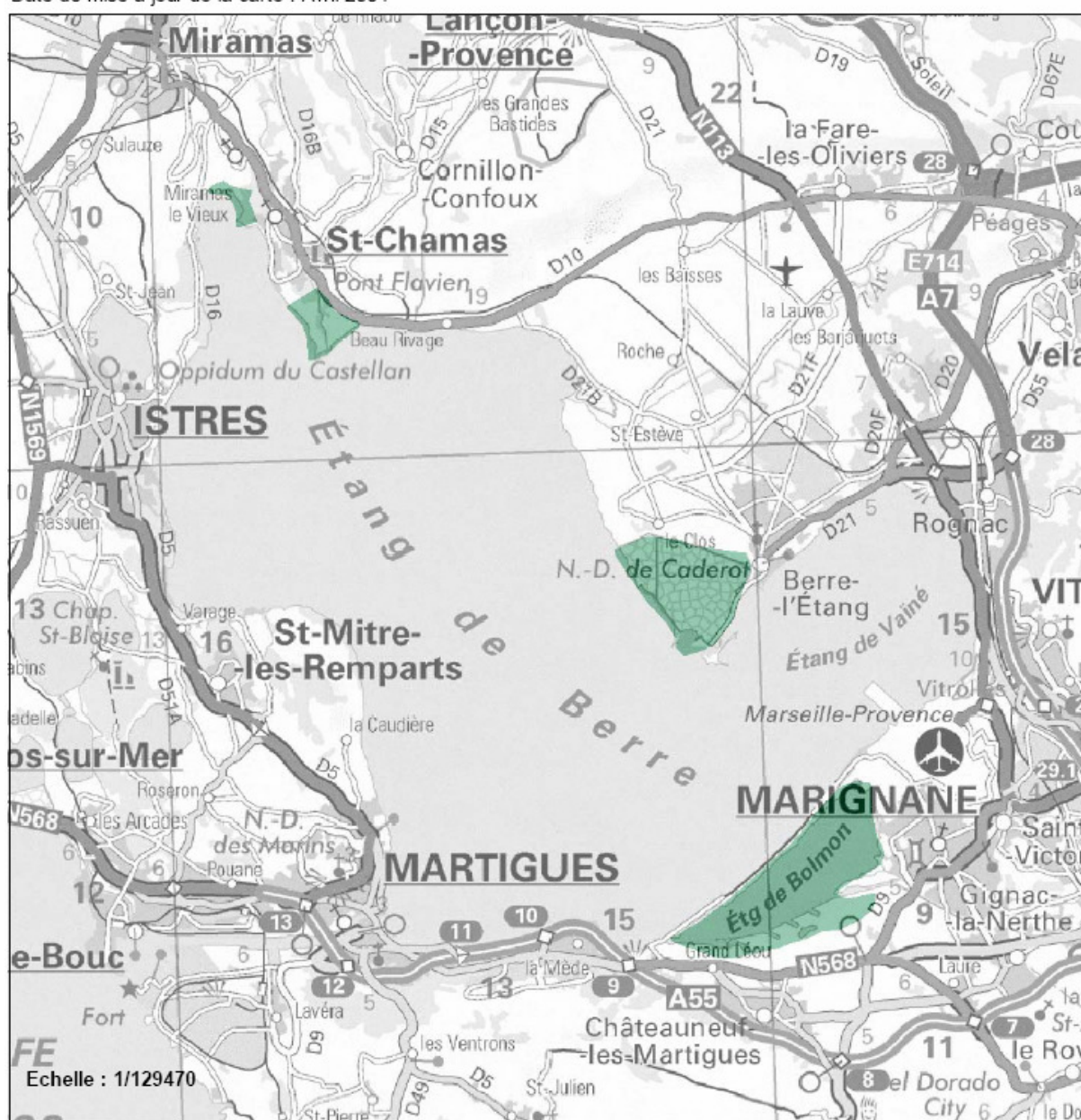
Compte tenu des différentes réserves naturelles qui entourent l'étang de Berre, il était primordial d'éviter d'endommager les écosystèmes locaux. Grâce aux cartes représentées ci-dessous, nous avons pu nous rendre compte de l'étendu de certains domaines.

Il est à noter que les zones ZNIEFF de la carte 1 sont, par définition, potentiellement classable en site protégé. Donc pour l'instant l'implantation du site éolien, à proximité de ces zones, reste négociable.

Ces 2 cartes issues d'une base de données interactives éditée par la DIREN comportent toutes les zones ZNIEFF sur la carte 1 et les zones classées site protégé sur la carte 2.

Inventaire du Patrimoine Naturel de Provence- Alpes-Côtes d'Azur

Date de mise à jour de la carte : Avril 2004



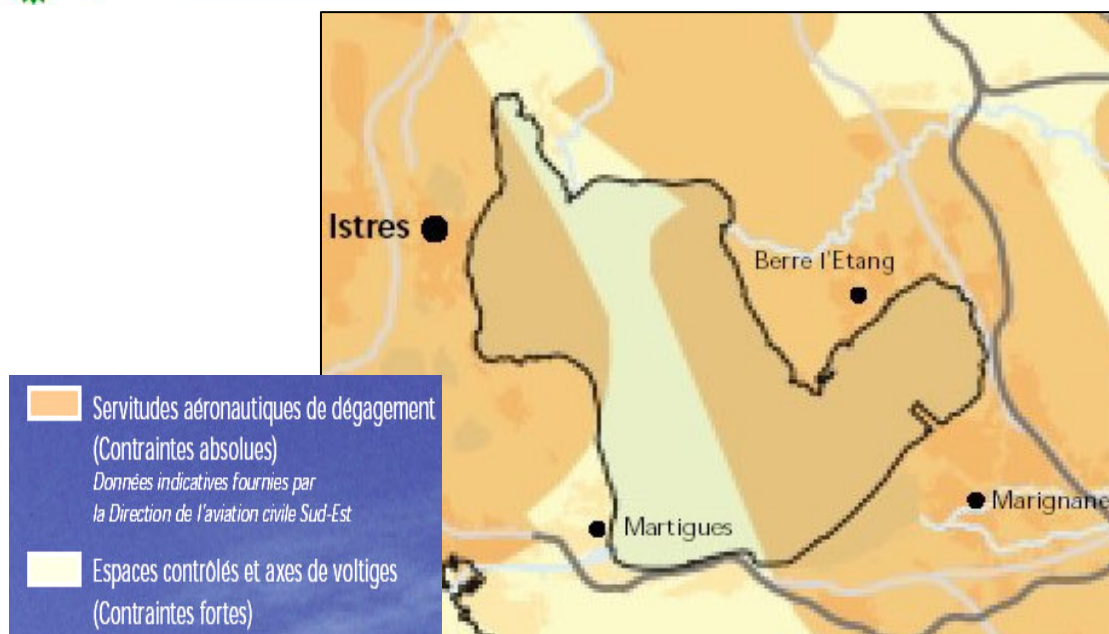
Inventaire du Patrimoine Naturel de Provence- Alpes-Côtes d’Azur

Code régional	Nom	Type
ZNIEFF N°13-154-100	Étang de Berre, étang de Vaine	Zone de type II

c. activité industrielle

Comme on l’a vu dans la première partie, l’étang de Berre est entouré de plus d’une quarantaine d’industries (Pétrochimie, aéroport, Métallurgie, etc.), chacune avec ses caractéristiques de fonctionnement (pipelines pour la pétrochimie ou couloirs aériens pour les aéroports) ; de ce fait il convenait, pour notre implantation d’éoliennes off-shore, de ne pas entraver l’activité de chacun.

Site Industriel de l'Etang de Berre



Il est à noter, que les zones de couloirs aériens ne sont en aucun cas exploitable pour notre projet en raison de la réglementation et de la taille des éoliennes (Entre 60 et 100m de haut).

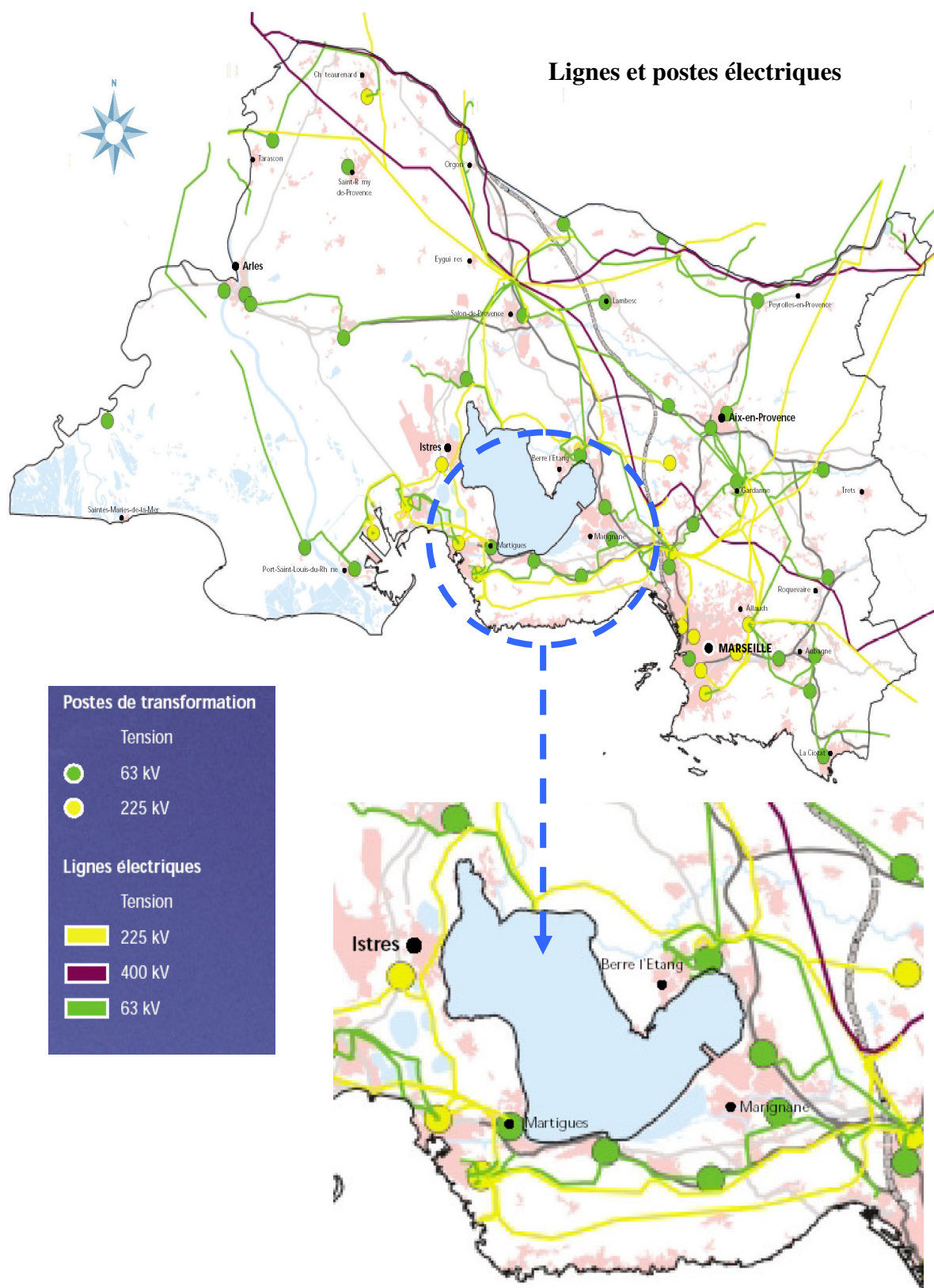
d. Autres facteurs de choix

➤ Profondeur de l'étang :

En fonction du type d'éoliennes off-shore, une certaine profondeur de l'étang est à prendre en compte. D'après les données constructeurs cette profondeur s'échelonne entre 15 et 20 mètres, pour l'implantation d'éoliennes off-shore ; l'étang de Berre ayant une profondeur maximale de 9,5 mètres, il y n'y a donc aucune contrainte de profondeur.

➤ Réseau électrique :

La proximité entre le parc éolien off-shore et le réseau électrique est à prendre en compte dans la mesure où il serait préférable de limiter les coûts de raccordement.



➤ Site de la Durance :

D'après le sujet de l'étude, on envisagera un stockage de la production si elle ne correspond pas à la charge et on regardera si un couplage à l'hydraulique du site de la Durance est envisageable pour faire du pompage, de ce fait un rapprochement du parc éolien vers ce site est à prendre en compte. Tout ceci dans un soucis d'optimisation de l'exploitation éolienne et de réduction des coûts de raccordement.

Le site de production hydroélectrique le plus proche est celui de St Chamas, il est donc susceptible de mettre en place une plate-forme de pompage hydraulique.



➤ Accès au site éolien

La facilité d'accès au site éolien est à prendre en compte, que ce soit sur les réseaux routiers, ferroviaires et maritimes, car il serait préférable de limiter les coûts d'acheminement, lors de l'assemblage des éoliennes.



DIREN

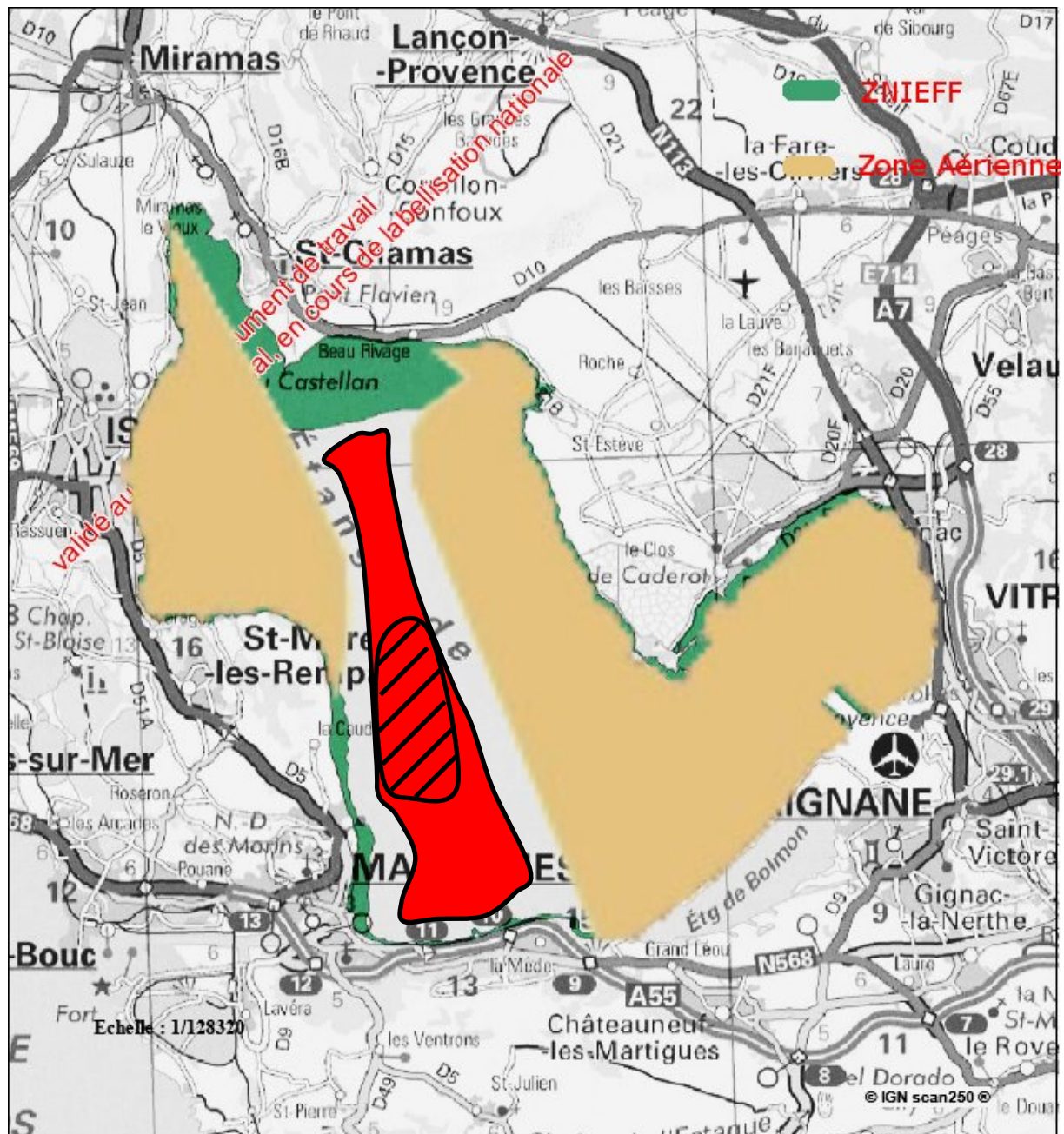
Adresse postale : LE THOLONET
BP 120 - 13603 Aix en Provence - Cedex 1
Téléphone : 04.42.66.66.00 - Télécopie : 04.42.66.66.01

© IGN scan250 ®

e. Bilan

Au vue de toutes ces contraintes voici la zone d'implantation potentielle, en rouge, qui a été choisi. Cette zone ne sera pas entièrement exploitée en raison de l'activité maritime de l'étang de Berre, et également pour des raisons d'accessibilité.

De ce fait nous avons réduit la zone d'implantation du parc éolien, en hachuré.



A partir de maintenant, il sera question de déterminer la taille du parc éolien, en fonction de la surface disponible et de la taille des éoliennes.

2. Dimensionnement du parc éolien off-shore

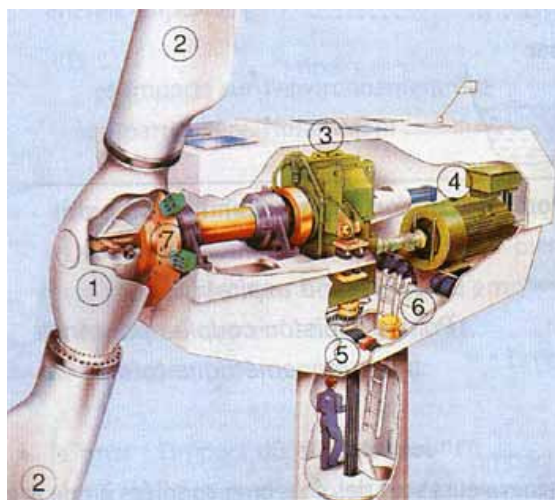
Suite un rapport d'échelle, la surface en rouge représentant notre parc éolien off-shore, est d'environ 11 Km². (voir carte page précédente).

⇒ Plage d'utilisation d'une éolienne:

Au-dessous d'un vent faible (4m/s), elle ne tourne pas, et en cas de vents violents, les pales sont mises en drapeau offrant un minimum de résistance au vent (en France, toutes les installations ont résisté à la tempête de 1999). Les éoliennes sont aujourd'hui complexes (mécanique de précision, électronique pour la régulation, matériaux composites pour les pales...). Côté technique, rien n'est encore figé; les machines se perfectionnent d'année en année et les différentes technologies illustrent les différentes 'Ecoles'.

⇒ Choix de l'éolienne :

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe différentes «école», cependant les composant reste les mêmes. Prenons comme exemple un des models de la marque **WindMaster**.



- 1 : rotor
- 2 : pales
- 3 : multiplicateur
- 4 : génératrice
- 5 : mécanisme d'orientation de la nacelle
- 6 : système hydraulique
- 7 : frein

- Une **tour cylindrique en acier** d'une hauteur comprise entre 60 et 100 mètres, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau .

- Une **nacelle** située en haut de la tour et qui comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le (ou les) générateur(s), les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne .

- Le **rotor** constitué de trois pales en matériaux composites d'une longueur de 30 à 45 mètres.

- Le **montage sur site** d'une éolienne est une opération courte (deux à trois semaines) mais complexe. Les principales étapes sont les suivantes :

- **L'aménagement des accès** et de la plate-forme située au pied de l'éolienne et servant à son montage.

- La **construction de la fondation** en béton d'un volume - total de 250 m³ au minimum. Nous décidons de mettre en place une fixation de structure gravitaire comme nous pouvons le voir sur le schéma .



- Le **raccordement au réseau électrique** : celui-ci est entièrement enterré jusqu'au poste source EDF le plus proche. Les éoliennes sont ensuite raccordées entre elles et au poste source EDF par des câbles électriques entièrement enterrés, à une profondeur minimale de 80 cm. Ils sont positionnés de préférence le long des routes et des chemins existants ou à créer .

- **Le montage de l'éolienne** : tous les éléments sont transportés sur place par une quinzaine de camions semi-remorques. Une grue automotrice d'une capacité de levage de 500 tonnes est utilisée pour mettre en place les différents tronçons de la tour, la nacelle et les trois pales du rotor.

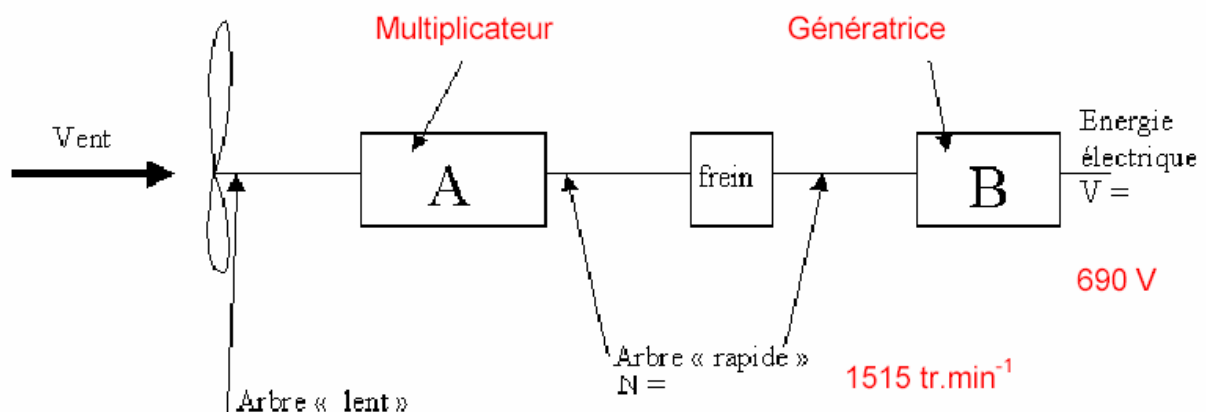
⇒ Choix de la hauteur du mât.

La puissance du vent est proportionnelle à la vitesse au cube. En conséquence, si le vent augmente un peu, la puissance peut augmenter de façon très importante. Au contraire, les turbulences nuisent au bon fonctionnement de l'éolienne car le vent turbulent est beaucoup moins puissant qu'un vent laminaire. C'est bien entendu plus simple en théorie qu'en pratique car le vent est à chaque instant soumis à des contraintes micro et macro géographiques. Des effets saisonniers peuvent également se faire sentir. Plus le mât est haut, plus le vent est fort et moins il est turbulent. D'une manière un peu empirique, l'éolienne devrait être placée 10 m au dessus de tout obstacle présent dans un cercle de 150m de rayon dont l'éolienne serait le centre. Par conséquent, en raison de son implantation offshore, nous décidons de prendre comme hauteur de mat 60 mètres.

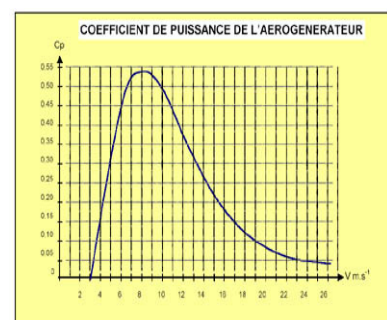
Remarque :

Avec un vent de 160 km/h, la poussée axiale en tête de mât est de 36DaN. Il faut donc prévoir un coefficient de sécurité d'au moins 2.5 et une valeur de sécurité de 90DaN. Du fait du principe d'effacement vertical, la poussée s'exerce en grande partie vers le bat par vent violent. Si ce coefficient n'est pas respecté, il sera plus prudent d'arrêter l'éolienne ou de la ramener au sol en cas de vent dépassant 160 km/h.

hypothèses :



Comme il est défini sur le schéma, nous considérerons que notre éolienne doit fournir une tension de 690 V pour une vitesse de vent de l'ordre de 30 km/h soit pour une vitesse de rotation de l'arbre de 1515 tr/min. Le rendement mécanique de l'ensemble (**rm**), est estimé à 90% et le rendement de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique (**re**) est estimé à 96%. Les essais en soufflerie permettent de définir, pour un profil de pale considéré et une commande d'asservissement associée, un



coefficient de puissance C_p caractéristique de chaque éolienne. Ce coefficient C_p permet de déterminer la puissance disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur par application de la relation suivante, issue de la **loi de Betz** :

$$P_{\text{mécanique disponible}} = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3$$

On prendra
suivantes pour:

les valeurs

$$\begin{aligned} C_p &= 0.52 \\ \rho &= 1.225 \text{ kg.m}^{-3} \text{ à } 15^\circ\text{C} \\ v &= 8.3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

puissance mécanique d'entrée :

$$\begin{aligned} P &= 660 / (0.9 * 0.96) \\ P &= 763.888 \text{ kW} \end{aligned}$$

Dimensionnement du disque éolien :

$$\begin{aligned} C_p &= 0.52 \\ S &= 2 P / (C_p * \rho * v^3) \\ S &= 2 * 763.888 / (0.52 * 1.225 * 8.33^3) \\ S &= 4149 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Or $S = \pi D^2 / 4$ on a **$D = 51,4 \text{ m}$**

Par conséquent nous prendrons comme diamètre d'éolienne 54 m, soit une puissance de 1000 kW.

Le nombre d'éolienne dépend de l'espace disponible sur le site. Nous chercherons à fournir un maximum d'énergie avec les hypothèses posées. Sachant qu'une distance d'environ 500 mètres entre chaque éolienne est à respecter. Dans le chapitre précédent nous avons déterminé que cette zone d'implantation représenté une surface d'environ 11 km². Ainsi notre champs éolien comportera au plus environ 80 éoliennes.

3. Raccordements

Dans le cadre de la réglementation actuelle et de façon générale:

- La RTE gère les demandes de raccordement des installations de puissance supérieure à 12 MW .
- L'EDF Réseau de Distribution gère les demandes de raccordement des installations de puissance inférieure ou égale à 12 MW .

Le lien suivant présentent en détail les procédures et les démarches pour effectuer le raccordement avec le réseau national. <http://www.rte-france.com/>

Tenant compte de la situation du site, nous avons étudié, initialement, deux simulations de raccordement possible.

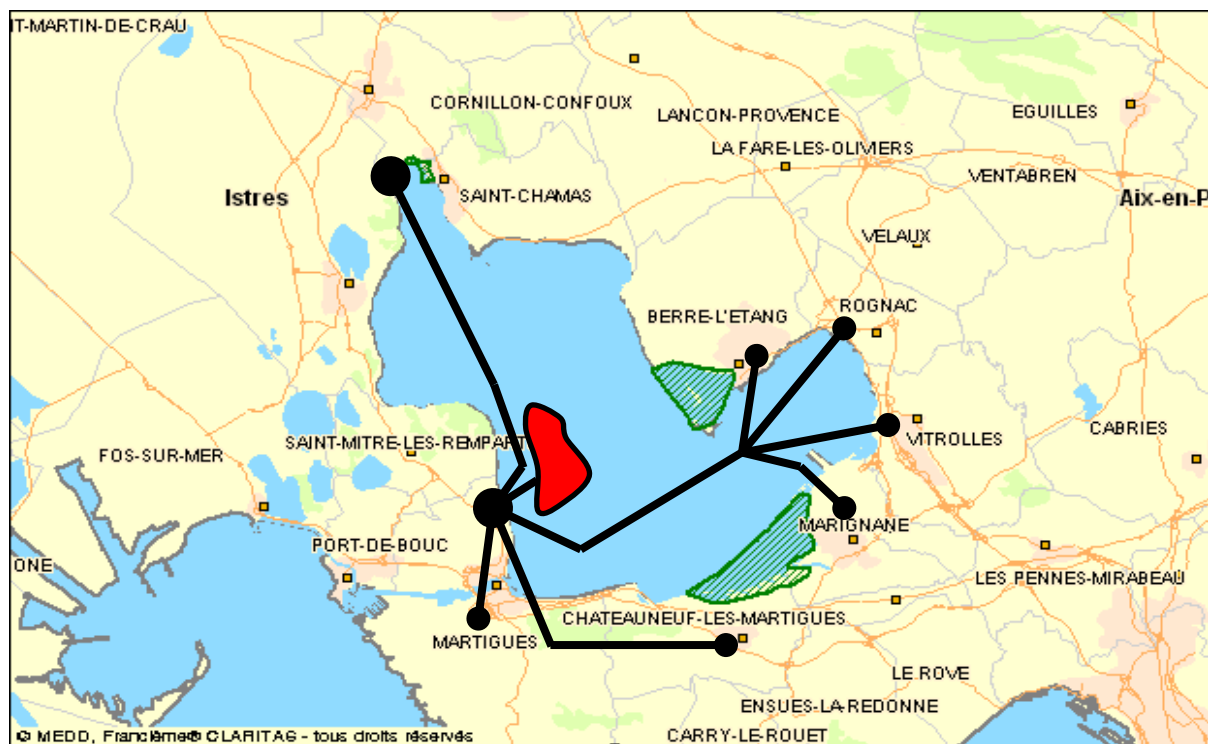
≡ **Simulation 1**

Généralement les raccordements réseaux longent les routes, d'où la présente configuration. Et en fonction de la quantité d'énergie redistribué dans le réseau, certaines villes et/ou industries pour être desservies ou non.



Simulation 2

Dans ce cas les distances de câblages seront plus courtes, mais le coût d'entretien pourrait s'avérer exorbitant, compte tenu du milieu.



La première proposition nous paraît plus pertinente et moins onéreuse. Notre choix va logiquement pour ce type de solution.

4. Estimations des coûts

Pour un parc potentiel de 80 éoliennes, la production unitaire annuelle d'électricité avec l'hypothèse de 12 heures de fonctionnement par jour est estimée à 2.85 Giga Wh.

Selon : <http://www.windpower.org/>

Prix du parc éolien :

- 1 MégaWatt (Raccordements compris) : 1.6 Millions d'Euros pour une éolienne
- D'où le Prix d'une éolienne offshore de 1 000 kW (fondations, raccordements compris) est de 1.6 Millions d'Euros
- Maintenance pour une éolienne par an : 0.05 Euros/kWh
- Acheminement sur le site : 20 000 Euros par éolienne
- Coût total de l'installation : $(1.6 \text{ Millions} + 20\,000) * 80 = 129\,600\,000$ Euros
- Coût total de la maintenance par an pour une éolienne : $0.05 * 1000 \text{ kW} * 80 = 4\,000$ Euros

Remarque :

Selon l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le prix du kilowatt installé est évalué à 1 000 Euros; soit 10 Millions d'Euros; pour un parc de 10 MW. L'achat des éoliennes représente 70 à 80 % de ce coût d'investissement.

Production du parc :

La consommation du poste de contrôle est négligeable par rapport à l'électricité produite par le parc éolien.

En tenant compte du taux actuel de rachat du kilowatt heure par EDF, qui est de 0.08 cents sur les 5 premières années d'exploitation (Source : Article La Tribune « *Les énergies renouvelables ont le vent en poupe* » d'Eliane Kan, conformément à l'arrêté JO du 22 Juin 2001 : 0.08 Cents pendant 5 ans, puis un tarif dégressif pendant les 10 autres années. A partir de la 16^è année: 0.04/KW), et d'un taux de production moyen d'environ 3.65 GW/an ; le projet se rentabilise au bout d'environ **7 ans**.

Il est à noter que l'on peut jouer sur le nombre d'éolienne et sur la production annuelle d'électricité pour augmenter ou réduire le temps de rentabilité du projet.

Investissement :

Investissement de départ :

Coût total de l'installation = 129 600 000 Euros

Production :

$80 * 2.85 \text{ GW/an} * 0.08 = 18\,240\,000 \text{ Euros/An}$

Coût total de la maintenance par an pour une éolienne = 4 000 Euros

Bénéfices dégagés par l'exploitation : $18\,240\,000 - 4\,000 = 18\,236\,000 \text{ Euros/An}$

$129\,600\,000 / 18\,236\,000 = 7.1 \text{ années}$

IV. Conclusion

Le sujet qui nous a été proposé, est un projet technico-économique s'inscrivant dans une politique de développement durable. L'implantation d'un parc éolien offshore sur le site de l'étang de Berre est une éventualité à prendre en compte, en vue de réduire la production de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui 16 Février 2005, avec l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto pour 34 pays industrialisés l'ayant ratifié, ce projet est tout à fait d'actualité. Les données sur cette énergie renouvelable s'enrichissent de jour en jour, avec le nombre croissant de fabricants et de sites exploités. Le coût du kilowatt installé est en baisse constante du fait de la concurrence et de la continuelle évolution des technologies.

Le site de Berre est un des principaux potentiel des Bouches du Rhône. Cette surface plate au milieu des terres semble prédestinée à accueillir ce type de technologie. La couverture aérienne reste cependant un handicap majeur pour l'élaboration d'un tel projet, amputant la surface exploitable de la majorité de sa superficie.

La faible profondeur des eaux de ce site facilite la mise en place d'un plus grand nombre de type de technologies, n'ayant pas la nécessité d'une infrastructure résistant à de forts courants marins.

La situation écologique de l'étang a été rendu catastrophique par la concentration d'industries le bordant et par les rejets qu'elles entraînent. De nombreux plans d'action pour sa réhabilitation ont été engagés et sont en cours. La prise en compte de leur caractéristiques et le partenariat avec les associations ayant ces études en charge est nécessaire pour l'implantation du parc.

Le type de technologie à mettre en place ne semble pas incompatibles avec les enjeux de cette réhabilitation.