

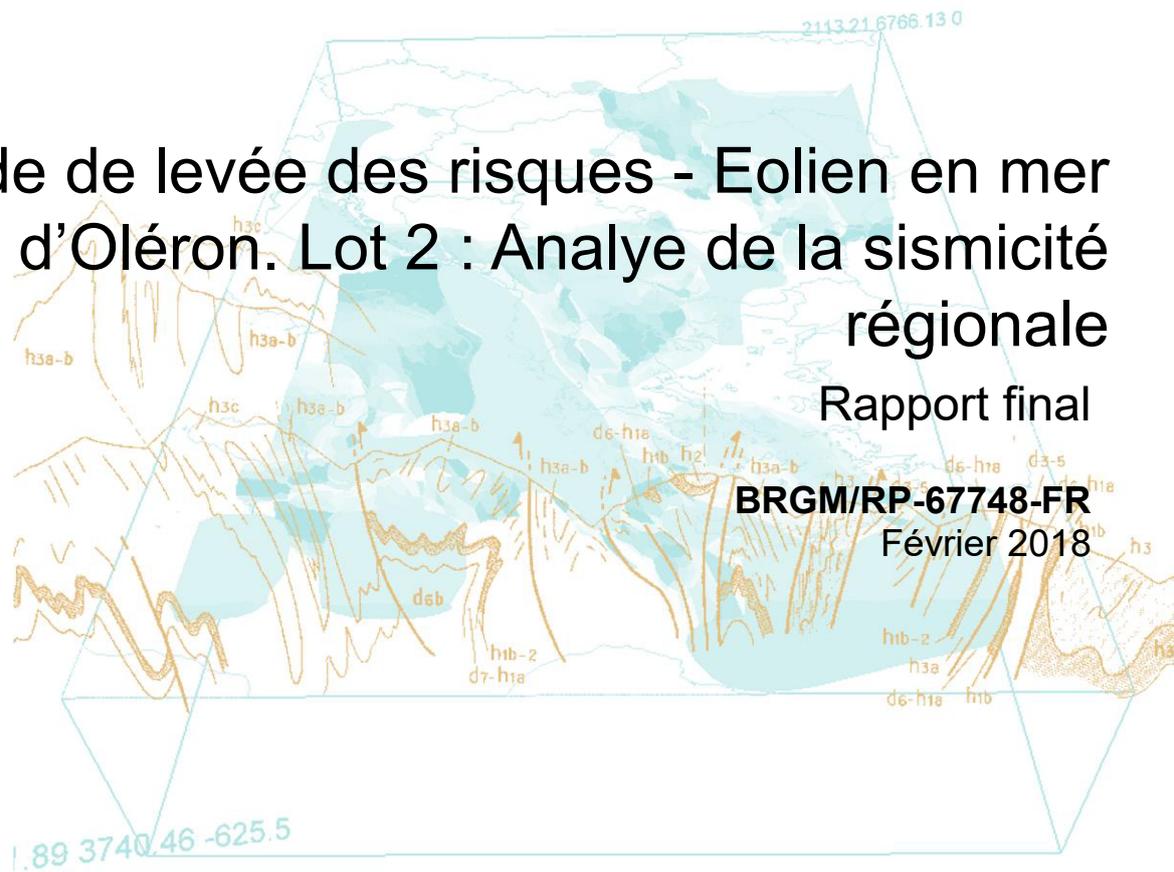


Etude de levée des risques - Eolien en mer Zone d'Oléron. Lot 2 : Analyse de la sismicité régionale

Rapport final

BRGM/RP-67748-FR

Février 2018



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Etude de levée des risques - Eolien en mer Zone d'Oléron. Lot 2 : Analyse de la sismicité régionale

Rapport final

BRGM/RP-67748-FR
Février 2018

Lot 2 de la convention
BRGM / MTES [DGEC] n° 2201101063

D. Bertil, J. Rey

<p>Vérificateur :</p> <p>Nom : M. Belvaux</p> <p>Fonction : RSP</p> <p>Date : 4 juin 2018</p> <p>Signature : </p>

<p>Approbateur :</p> <p>Nom : J.-C. Guillaneau</p> <p>Fonction: Resp. DGR</p> <p>Date :  21/06/2018</p> <p>Signature :</p>
--

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Pour la diffusion de ce rapport se reporter à la convention BRGM / MTES [DGEC] n° 2201101063.

Mots-clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bertil D., Rey J. (2018) Etude de levée des risques – Eolien en mer – Zone d’Oléron. Lot 2 : Analyse de la sismicité régionale. Rapport final BRGM/ RP-67748-FR -FR. 37p., 14 Ill., 1 Ann.

© BRGM, 2018, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le quatrième appel d'offres « éolien en mer » s'inscrit dans le cadre de la poursuite du développement de l'éolien en mer posé, qui contribue à l'atteinte de l'objectif de 40 % d'électricité renouvelable à l'horizon 2030, fixé par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. La zone retenue pour l'implantation du prochain parc éolien en mer se situe au large de l'île d'Oléron.

Des études de levée des risques liés au vent, à la houle, au courant, à la profondeur et à la composition des sols, sont réalisées par des établissements publics, en amont de la désignation du lauréat afin que les résultats obtenus puissent être exploités dans le cadre du dialogue concurrentiel.

Pour répondre aux besoins de la DGEC, le BRGM a proposé un programme subdivisé en 5 lots correspondant aux actions majeures nécessaires pour apporter une connaissance sur la géologie du substratum de la zone « Oléron » et lister les risques potentiels existants associés.

Ce présent rapport concerne le **Lot 2** : Analyse de la sismicité régionale.

Un catalogue de sismicité historique et instrumentale est constitué dans un rayon de 150 km autour de la zone du parc Eolien. La zone du Parc est située sur la bordure Sud d'une vaste zone de sismicité diffuse qui englobe le Massif Armoricain et ses bordures. Plusieurs séismes de magnitude supérieure à 5.0 se sont produits entre 20 et 140 km de distance. Le séisme le plus fort, séisme de Bouin en 1799, a atteint une magnitude estimée à 6.3.

L'île d'Oléron a un passé sismique notoire et régulièrement des séismes sont largement ressentis dont 8 séismes de magnitude ≥ 4.0 en 1706, 1805, 1829, 1955, 1958, 1972, 1973, 2016. Le plus fort séisme observé s'est produit le 7 septembre 1972 avec une magnitude 5.0 occasionnant des dommages légers dans l'île. Les mécanismes au foyer sont soit en faille normale soit en décrochement dextre selon des directions N100 à 120° en cohérence avec les accidents tectoniques hercyniens identifiés sur la carte géologique. Par ailleurs des séismes de faibles magnitudes (≤ 2.5) sont localisés à l'intérieur des limites de la zone prévue pour le parc éolien.

L'état de connaissance sismotectonique de la zone est faible et les causes de la sismicité locale encore en débat.

L'île d'Oléron est située en zone de sismicité 3 (« sismicité modérée ») selon la réglementation sismique en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011.

Les parcs éoliens terrestres sont des Installations Classées Pour l'Environnement (ICPE) soumis à déclaration ou autorisation selon la hauteur des éoliennes et la puissance de la production électrique. Pour les ICPE soumis à déclaration, la réglementation parasismique de risque normal s'applique (bâtiments de production d'énergie classés en catégorie d'importance III, éoliennes non concernées). Pour les ICPE soumises à autorisation, la réglementation parasismique pour les ouvrages dits « à risque spécial » s'applique.

Les éoliennes offshore sortent du cadre prévu pour la réglementation parasismique qui prend en compte l'occupation humaine alentours et des limites territoriales terrestres. Il n'en est pas de même pour les installations à terre liées au parc Eolien. Le poste de transformation électrique est ainsi une installation assimilée selon la réglementation parasismique en vigueur à un ouvrage dit « à risque normal » de catégorie d'importance III.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Activité sismotectonique autour du site.....	9
2.1. CONTEXTE SISMOTECTONIQUE REGIONAL.....	9
2.2. CATALOGUE DE SISMICITE REGIONALE.....	13
2.2.1. Compilation du catalogue de sismicité régional.....	13
2.2.2. Description de la sismicité régionale	15
2.2.3. Description de la sismicité proche.....	17
2.3. LES FAILLES AUTOUR DU SITE	23
3. Etat des lieux sur les normes parasismiques	25
3.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE GENERAL	25
3.1.1. Le cadre réglementaire pour l'éolien	25
3.1.2. Rappels de Principes généraux de la réglementation parasismique	25
3.1.3. Attestations parasismiques pour les demandes de permis de construire en domaine terrestre.....	26
3.2. CLASSEMENT DES CATEGORIES D'EOLIENNES ET REGLEMENTATION APPLICABLE EN DOMAINE TERRESTRE	27
3.2.1. Eoliennes assimilées à des bâtiments à « risque normal » :	28
3.2.2. Eoliennes assimilées à des bâtiments à « risque spécial » :	29
3.3. CAS DES EOLIENNES OFFSHORES :	29
3.4. BILAN	30
3.5. RECHERCHE DE GUIDES OU NORMES CONCERNANT LES EOLIENNES	30
3.5.1. Guides techniques français.....	30
3.5.2. Guides techniques internationaux.....	30
3.5.3. Sélection de travaux scientifiques	31
3.5.4. Retour d'expérience sur l'Europe du Nord	32
4. Aide et Piste.....	33
5. Bibliographie	35

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation du parc éolien (cadre noir) sur fond de la carte géologique de la France au million (Chantraine et al., 2003). Le trait noir épais limite les deux entités géologiques principales : le Massif armoricain et le bassin Aquitain.....	9
Illustration 2 : Sismicité de la France du catalogue FCAT-17 (Manchuel et al., 2017) et éléments linéaires structuraux de la carte géologique de la France (Chantraine et al, 2003) : épicentres = cercles rouges, failles à terre en noir, failles en mer en gris, discontinuités géophysiques en magenta. La zone du parc est représentée en vert entourée d'un cercle de rayon 40 km.	10
Illustration 3 : Schéma structural et géodynamique régional d'après Mazabraud et al (2013). Les mécanismes au foyer proviennent de Nicolas et al (1990). Les étoiles vertes représentent les séismes d'Hennebont 2002 et d'Oléron 1972.....	11
Illustration 4 : Périodes d'exhaustivité du catalogue de sismicité constitué pour l'étude.	14
Illustration 5 : Sismicité dans un rayon de 150 km autour du Parc Eolien. Les séismes en rouge numérotés de 1 à 8 sont ceux de magnitude ≥ 5.0 listés dans le tableau de l'illustration 6. En fond, la carte géologique de Chantraine et al. (2003)	15
Illustration 6 : Séismes de magnitude $M_w \geq 5.0$ dans un rayon de 150 km autour du Parc Eolien	16
Illustration 7 : Sismicité dans un rayon de 40 km autour du Parc Eolien	17
Illustration 8 : Sismicité instrumentale entre 1970 et 2017 dans un rayon de 40 km autour du Parc Eolien	18
Illustration 9 : Séismes de magnitude ≥ 3.5 dans un rayon de 40 km autour du Parc Eolien.....	18
Illustration 10 : Mécanismes au foyer des séismes de 1972, 2005 et 2010, d'après Mazabraud et al (2013).....	20
Illustration 11 : Mécanismes au foyer de la crise de 1972-1977 (Nicolas et al., 1990) et du séisme du 28 Avril 2016 (mécanisme CEA-LDG dans Sira et al., 2016).....	21
Illustration 12: Séismes dans la zone du Parc (à moins de 10 km du point central).....	22
Illustration 13 : Eléments linéaires structuraux autour du site d'après la carte au 1 : 1 000 000 de Chantraine et al (2003)	23
Illustration 14 : Textes réglementaires pour la construction parasismique en France (d'après www.planseisme.fr).....	26

Liste des annexes

Annexe 1 Séismes de magnitude $M_w \geq 3.0$ à moins de 150 km du site	37
--	----

1. Introduction

Le quatrième appel d'offres « éolien en mer » s'inscrit dans le cadre de la poursuite du développement de l'éolien en mer posé, qui contribue à l'atteinte de l'objectif de 40 % d'électricité renouvelable à l'horizon 2030, fixé par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. La zone retenue pour l'implantation du prochain parc éolien en mer se situe au large de l'île d'Oléron. La superficie de cette zone est d'environ 120 km².

Des études de levée des risques liés au vent, à la houle, au courant, à la profondeur et à la composition des sols, sont réalisées par des établissements publics, en amont de la désignation du lauréat afin que les résultats obtenus puissent être exploités dans le cadre du dialogue concurrentiel.

C'est dans ce contexte que le BRGM se voit confier la réalisation d'études de levée des risques liés à la géologie. Pour répondre aux besoins de la DGEC, le BRGM propose un programme subdivisé en 5 lots correspondant aux actions majeures nécessaires pour apporter une connaissance sur la géologie du substratum de la zone « Oléron » et lister les risques potentiels existants associés :

Lot 1 : Desktop Study

Lot 2 : Analyse de la sismicité régionale

Lot 3 : Mise à disposition et analyse du levé magnétique existant

Lot 4 : Sous-traitance, traitement et mise en forme des données

Lot 5 : Cartographie géologique du substratum sur la base des nouvelles données sismiques

Ce présent rapport concerne **le Lot 2** qui a pour objectif :

- de faire un état des lieux de l'activité sismotectonique autour du site
- de faire un état des lieux des normes parasismiques applicables pour des éoliennes et les exigences selon les sites onshores ou offshores
- de donner des pistes pour des compléments d'étude éventuels pour l'aléa sismique et sa prise en compte pour le dimensionnement parasismique.

2. Activité sismotectonique autour du site

La situation de la zone d'étude envisageable pour le parc éolien est indiquée par un polygone noir sur Illustration 1. Par simplification, elle sera nommée « parc éolien » dans la suite de ce rapport.

2.1. CONTEXTE SISMOTECTONIQUE RÉGIONAL

Si le parc éolien se situe clairement sur des terrains géologiques du Bassin Aquitain (cf. Illustration 1 ci-dessous ou illustration 3 du Lot 1), il se place sur la bordure Sud d'une vaste zone de sismicité diffuse qui couvre l'ensemble du Massif Armoricain et qui déborde vers le Sud jusqu'à Oléron (Illustration 2).

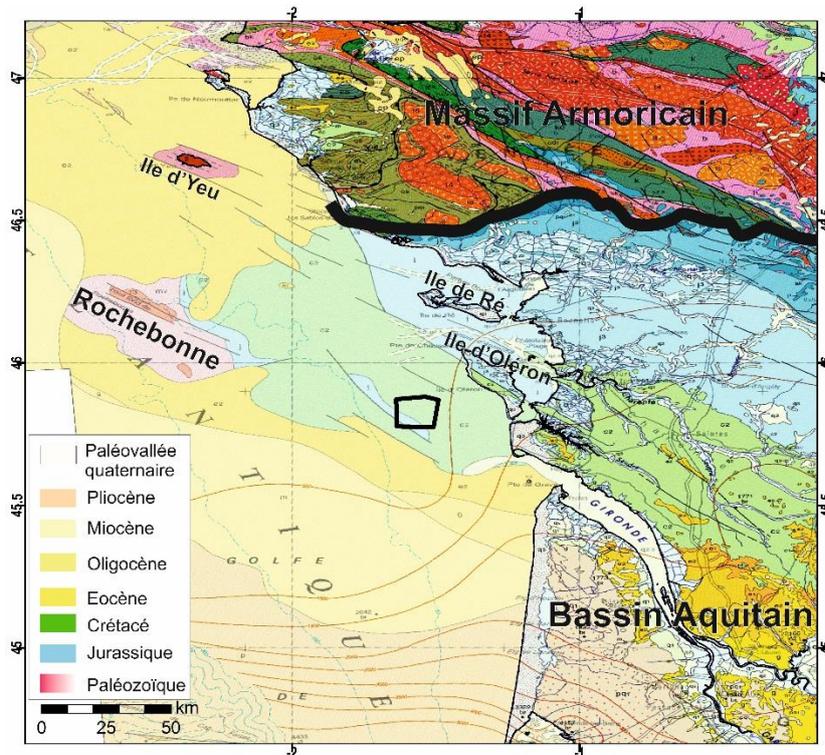


Illustration 1 : Localisation du parc éolien (cadre noir) sur fond de la carte géologique de la France au million (Chantraine et al., 2003). Le trait noir épais limite les deux entités géologiques principales : le Massif armoricain et le bassin Aquitain.

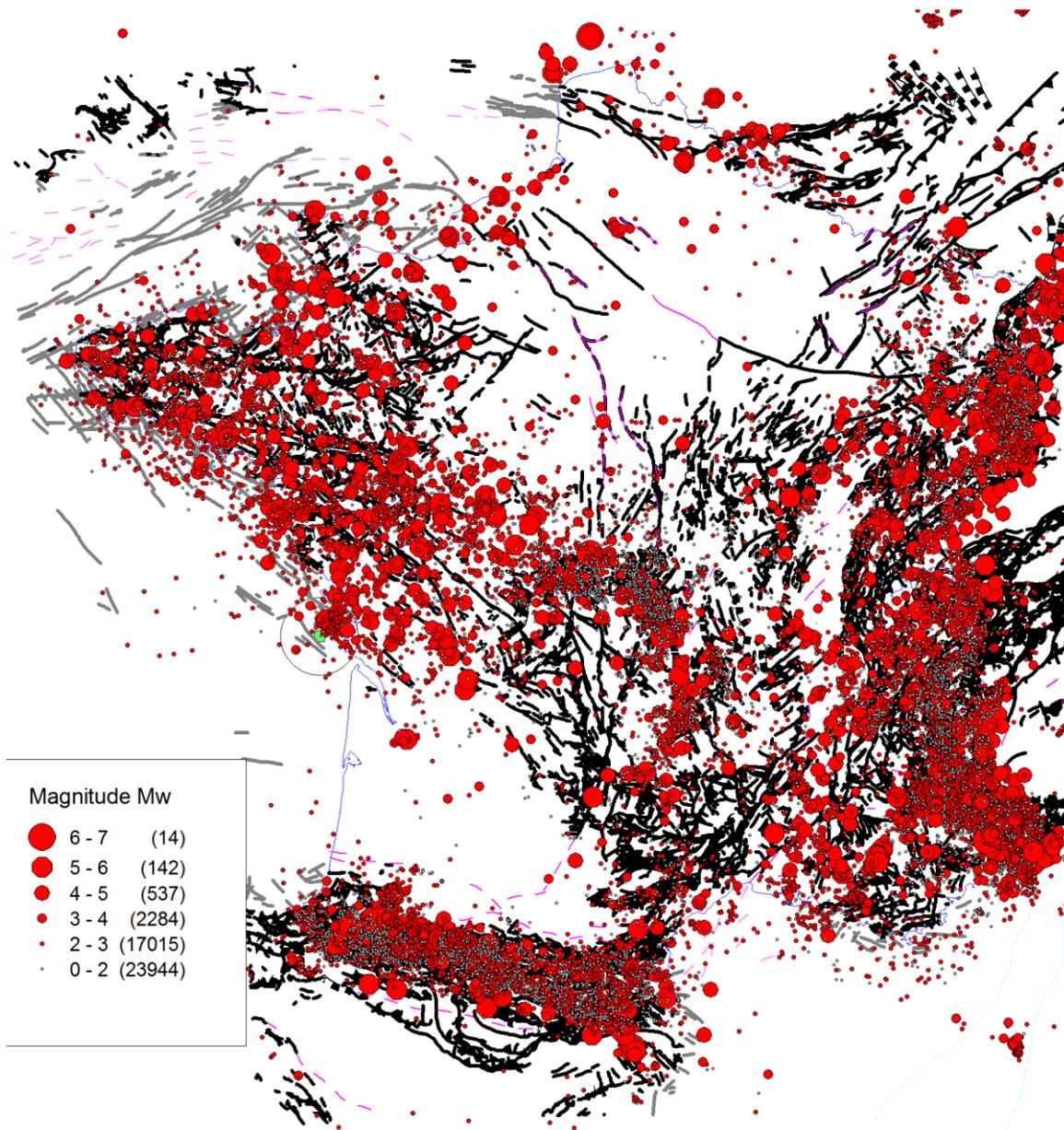


Illustration 2 : Sismicité de la France du catalogue FCAT-17 (Manchuel et al., 2017) et éléments linéaires structuraux de la carte géologique de la France (Chantraine et al, 2003) : épicentres = cercles rouges, failles à terre en noir, failles en mer en gris, discontinuités géophysiques en magenta. La zone du parc est représentée en vert entourée d'un cercle de rayon 40 km.

D'un point de vue schéma structural, 2 grandes zones de cisaillement majeur séparent le massif armoricain en 3 domaines : les domaines Nord Armoricain (DNA), Centre Armoricain (DCA) et Sud Armoricain (DSA). Il s'agit des zones de cisaillement Nord Armoricain (ZCNA, ou NASZ sur Illustration 3) et Sud Armoricain (ZCSA ou SASZ sur Illustration 3) d'âge hercynien (plus de 300 Ma) (Rolet, 1994).

La sismicité ne se concentre pas seulement sur ces 2 accidents mais couvre en fait l'ensemble de la zone. La sismicité instrumentale de cette région Ouest est régulière et relativement importante à l'échelle du territoire métropolitain. Elle est globalement soumise à un régime de

décrochement avec une composante compressive NW-SE (Golke & Coblentz 1996, Nocquet, 2012 ; Illustration 3).

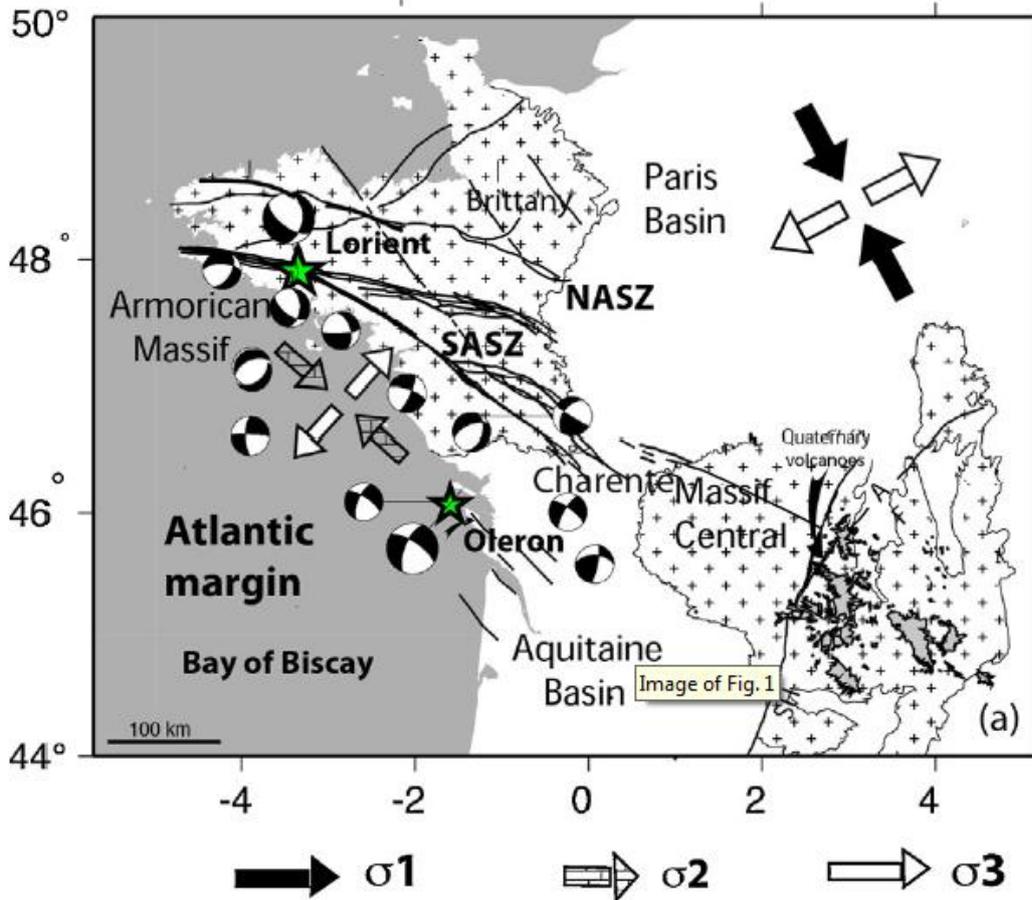


Illustration 3 : Schéma structural et géodynamique régional d'après Mazabraud et al (2013). Les mécanismes au foyer proviennent de Nicolas et al (1990). Les étoiles vertes représentent les séismes d'Hennebont 2002 et d'Oléron 1972

Le domaine Sud-Armoricain est caractérisé par une structuration NW-SE dans la chaîne varisque développée au cours du Paléozoïque supérieur (-360 à -250 Ma) (Brun et Burg, 1982). Du Jurassique terminal au Crétacé inférieur, se produit, par une phase de rifting et d'océanisation, l'ouverture du Golfe de Gascogne séparant le massif armoricain de la plaque Ibérie (Montadert et al., 1977). A partir du Crétacé terminal (-84 Ma) jusqu'au Tertiaire, la région est en régime de compression due à la convergence Europe – Afrique (Vigneresse, 1988). La phase de déformation paroxysmale est datée à l'Eocène.

Les causes de la sismicité actuelle sont encore soumises à discussions.

Ainsi selon le rapport BCSF 2010-R2 de Sira et al. (2010) il est précisé :

« Le massif armoricain apparaît comme un domaine intraplaque soulevé faisant partie de la lithosphère ouest-européenne, extension des avant-pays des Pyrénées et des Alpes (Ziegler et al, 1995). Les vitesses de soulèvement restent imprécises. Par exemple, l'incision des rivières au cours du dernier million d'années observée sur de grandes distances, indique des vitesses de

l'ordre de 0,05 mm/an (Bonnet, 1998 ; Bonnet et al., 2000). D'autre part, en se basant sur des mesures de nivellement disponibles uniquement pour le siècle dernier, l'estimation des variations verticales est de 0,2 à 0,6 mm/an, avec localement environ 1,1 mm/an (Lenôtre et al., 1999). Cependant, la part que l'on peut attribuer au soulèvement tectonique reste inconnue ». [...]

« Le champ de contrainte est encore mal connu. [...] Les contraintes horizontales pourraient être induites par la compression due, d'une part, à l'expansion océanique au niveau de la ride médio-océanique de l'Atlantique et d'autre part, à la compression alpine (Gölke et Coblenz, 1996). Cependant, pour expliquer la composante extensive de la déformation, on doit faire appel à d'autres forces telles que par exemple la compensation isostatique depuis la dernière déglaciation mais cette influence n'est pas clairement établie pour cette partie de l'Europe (Arroucau, 2006) ».

Pour Mazabraud et al (2013) : « l'occurrence d'événements sismiques de Magnitude > 4 le long des failles hercyniennes de la marge atlantique jusqu'à la limite nord-ouest du Massif Central est due à la réactivation locale de ces anciennes failles et de petites failles secondaires, favorisées par la concentration des contraintes due aux hétérogénéités, comme la présence de pluton et / ou la production locale de chaleur élevée dans la croûte. Ces variations de rhéologie peuvent favoriser les perturbations de stress. La coexistence de glissements et de failles normales dans la région révèle une accommodation de la déformation dans ce modèle structural hétérogène. ».

On est donc en présence d'une sismicité modérée mais diffuse sur tout le domaine, des réactivations d'anciennes failles hercyniennes, mésozoïques ou cénozoïques préexistantes et des causes encore en débat dans la communauté scientifique.

2.2. CATALOGUE DE SISMICITE RÉGIONALE

2.2.1. Compilation du catalogue de sismicité régional

Le catalogue de séismes principalement utilisé est le catalogue FCAT-17 de Manchuel *et al.* (2017) qui couvre l'ensemble de la France Métropolitaine et au-delà de la côte et des frontières jusqu'à 40 km de distance. FCAT-17 est une compilation du catalogue français de sismicité instrumentale SI-HEX 1962-2009 (Cara *et al.*, 2015) avec la sismicité historique connue et réévaluée dans le cadre du projet de recherche SIGMA, en utilisant la même échelle de magnitude, à savoir la magnitude de moment M_w ¹.

Ce catalogue a été complété jusqu'en décembre 2017 :

- Avec la version actualisée de SI-HEX entre 2009 et 2014 ;
- Avec le catalogue du LDG/CEA pour 2015-2017 et pour quelques événements situés en mer au-delà de la limite de 40 km fixée dans SI-HEX et FCAT-17 ;
- En convertissant les magnitudes M_{LDG} selon les formules de conversion de SI-HEX (Cara *et al.*, 2015).
- Par le séisme du 12 février 2018 localisé à 112 km vers Niort ($M_w=3.9$).

La sismicité est analysée dans une zone circulaire de rayon 150 km autour d'un point de coordonnées Latitude 45.8244°Nord, Longitude -1.5660°Ouest situé au centre de la zone d'implantation de futures éoliennes. Les séismes du catalogue ainsi constitué, de magnitude $M_w \geq 3.0$, sont listés dans le tableau de l'annexe 1.

Echelle de magnitude

A noter que l'échelle de magnitude de moment M_w , échelle de référence utilisée internationalement, est différente de l'échelle de magnitude M_{LDG} utilisée jusqu'à présent en France. Les estimations de magnitude en M_w sont systématiquement moins élevées que la magnitude M_{LDG} , particulièrement dans l'Ouest de la France. Ainsi les principaux séismes d'Oléron de 1972, 2005, 2010, 2016 estimés en magnitude M_{LDG} respectivement de 5.2, 4.6, 4.5, 5.0 sont donnés en M_w à 5.0, 3.4, 3.8, 4.3. L'échelle M_w est préférée ici car elle constitue la référence internationale et qu'elle est plus cohérente avec le ressenti et les estimations de dommages dans cette région.

Incertitudes sur les localisations de séismes

Les séismes sont d'autant mieux localisés que le réseau de stations sismiques est dense et que ces stations sont suffisamment bien réparties autour des épicentres. Aucune de ces conditions n'est réunie dans cette zone géographique. Il y a peu de stations sismiques et la localisation des séismes en mer et sur la frange côtière est mal contrainte. Des incertitudes de localisation de 10 km ou plus sur les épicentres sont possibles y compris pour les données les plus récentes.

¹ La magnitude mesure l'énergie libérée lors d'un séisme. Il existe plusieurs échelles de magnitude basées sur l'amplitude mesurée sur un sismographe. Ce mode de calcul induit des effets de saturation pour les plus gros événements. Une nouvelle échelle de magnitude M_w a été introduite en 1979, calibrée sur le moment sismique, d'où son nom de magnitude de moment. Le calcul est plus complexe, prenant en compte les basses fréquences des ondes sismiques. La magnitude de moment tend actuellement à être utilisée comme mesure unifiée de magnitude dans les catalogues de sismicité instrumentale.

Cette incertitude de localisation est du même ordre de grandeur que la dimension du périmètre délimité pour l'implantation des éoliennes

Périodes d'exhaustivité du catalogue

Le tableau de l'illustration 4 indique les périodes pour lesquelles le catalogue est considéré comme complet en fonction de la gamme de magnitude. Il est obtenu par une simple analyse qualitative du catalogue de sismicité. Il existe par ailleurs des méthodes statistiques d'analyse lorsqu'une meilleure précision est nécessaire.

Les séismes régionaux de magnitude $M_w \geq 5.0$ sont connus depuis au moins le milieu du XVIIème siècle. Il s'agit de séismes suffisamment forts pour être ressentis à grande distance et produire des dommages conséquents aux habitations proches de l'épicentre.

Les séismes de magnitude M_w 4.0-5.0 sont généralement des séismes largement ressentis mais sans dommages significatifs.

Les séismes dans la gamme M_w 3.0-3.5 sont complets/exhaustifs depuis environ 1962, date de début du catalogue de sismicité instrumentale. Les premiers séismes de magnitude < 3.0 détectés dans la région datent de la crise de 1972. La densification des réseaux sismologiques en France dans les années 1980 permet d'atteindre le seuil de M_w 2.0. Pour les séismes de magnitude 1.5 à 2.0, le catalogue n'est probablement pas exhaustif pour les séismes en mer, trop éloignés des stations sismiques. Il semble l'être sur le continent à partir des années 2000.

Gamme de magnitude	Date à partir de laquelle le catalogue est complet pour cette gamme de magnitude	Gamme d'intensité à l'épicentre (I0)
$M_w \geq 5.0$	Vers 1663	$\sim I_0 \geq VI-VII$
M_w 4.0 à 5.0	Vers 1750	$\sim I_0 \geq V$
M_w 3.5 à 4.0	Vers 1870	$\sim I_0 \geq IV$
M_w 3.0 à 3.5	Vers 1962	Non défini
M_w 2.5 à 3.0	Vers 1972 ?	Non défini
M_w 2.0 à 2.5	Vers 1985	Non ressenti
M_w 1.5 à 2.0	Non complet ?	Non ressenti

Illustration 4 : Périodes d'exhaustivité du catalogue de sismicité constitué pour l'étude.

2.2.2. Description de la sismicité régionale

La région couverte par le cercle de 150 km de rayon autour du parc est pour moitié en mer et pour moitié en milieu continental. Elle va de Cholet au Nord à Arcachon au Sud, et jusqu'à Angoulême vers l'Est.

Le catalogue de sismicité constitué pour l'étude selon cette limite circulaire, contient 1 117 évènements sismiques (cf. Illustration 5).

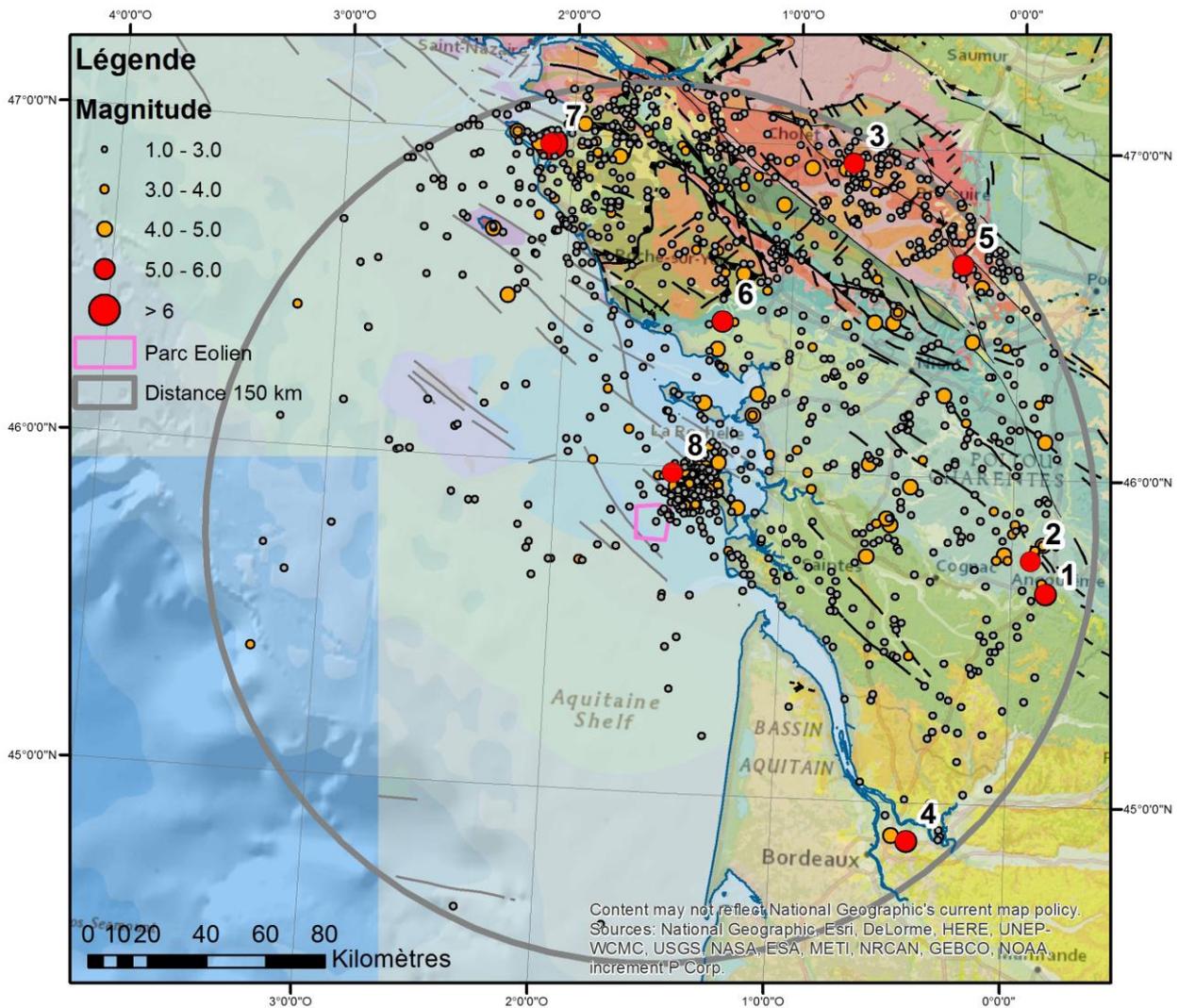


Illustration 5 : Sismicité dans un rayon de 150 km autour du Parc Eolien. Les séismes en rouge numérotés de 1 à 8 sont ceux de magnitude ≥ 5.0 listés dans le tableau de l'illustration 6. En fond, la carte géologique de Chantraine et al. (2003)

Selon ce catalogue constitué, huit séismes listés dans le tableau de l'illustration 6, auraient une magnitude supérieure à $M_w=5.0$. Il convient de noter que très peu d'informations sont disponibles sur les séismes les plus anciens de l'Angoumois (1014, 1208). La magnitude du séisme le plus fort est estimée à $M_w=6.3$ (25 janvier 1799, séisme du marais Breton n°7 sur l'illustration 5, voir aussi <http://www.sisfrance.net/documentsisfrance/Seisme%20Marais%20Breton%201799.pdf>). L'épicentre de ce séisme est situé à 133 km de distance du parc éolien, à proximité de Noirmoutier au Nord-Nord-Ouest.

L'évènement le plus proche est le séisme d'Oléron (7 septembre 1972, n°8 sur la figure) de magnitude $M_w=5.0$ dont l'épicentre est localisé à moins de 10 km de la limite Nord du parc éolien.

N°	Année	Mois	jour	HH	MN	LAT(deg)	LON(deg)	prof(km)	Mw	dist(km)	région
1	1014					45.650	0.150	14	5.4	135	Angoumois
2	1208	6	13			45.750	0.083	14	5.0	128	Angoumois ?
3	1663	1	14	0	5	46.950	-0.750	13	5.3	140	Bocage vendéen
4	1759	8	10	22	10	44.883	-0.417	11	5.4	138	Entre-Deux-Mers, Bordelais
5	1772	1	9	7		46.650	-0.250	14	5.7	136	Gatine (Parthenay)
6	1780	5	2	3	20	46.450	-1.300	15	5.1	72	Marais Poitevin
7	1799	1	25	3	45	46.967	-2.100	21	6.3	133	Marais Breton (Bouin)
8	1972	9	7	22	26	45.980	-1.490	11	5.0	18	Ile d'Oléron

Illustration 6 : Séismes de magnitude $M_w \geq 5.0$ dans un rayon de 150 km autour du Parc Eolien

Bien que située en zone dite d'aléa sismique modéré, la région présente une sismicité conséquente au Nord et à l'Est. Cette sismicité ne se limite pas à un secteur particulier mais couvre une large zone diffuse avec des magnitudes supérieures à $M_w=5.0$ observées aussi bien sur le Massif Armoricaïn que dans cette partie Nord du Bassin Aquitain (régions d'Angoulême, Bordeaux, Oléron, marais Poitevin...). Des séismes de magnitude $M_w=6$ et plus ne sont pas à exclure comme celui survenu à Bouin en 1799 dans le marais Breton. La période de retour de ces séismes est incertaine et les causes de cette sismicité sont encore hypothétiques.

2.2.3. Description de la sismicité proche

Sismicité dans un rayon de 40 km

Le catalogue de sismicité que nous avons constitué pour cette étude contient 243 séismes situés à moins de 40 km du parc éolien (Illustration 7). La très grande majorité d'entre eux se sont produits au Nord-Ouest, vers l'île d'Oléron. La sismicité en mer au Sud, vers le Golfe de Gascogne, est très clairsemée et de faible magnitude mais elle n'est pas inexistante.

A Oléron, la sismicité semble régulière avec un « bruit de fond » de petites secousses de magnitude $M_w=2.0$ à 2.5 (Illustration 8) entrecoupé de périodes d'activité plus importante :

- la crise de 1972 avec le séisme principal le 7 septembre 1972 (M_w 5.0, M_I 5.2) et une activité qui s'est poursuivie jusqu'en 1978
- la crise de Mars à Mai 2005 avec un choc principal à M_w 3.4 (M_I 4.6)
- le séisme du 28 Septembre 2010 (M_w 3.8, M_I 4.5)
- le séisme du 16 avril 2016 ($M_I=5.0$, M_w 3.9 selon le catalogue international NEIC)

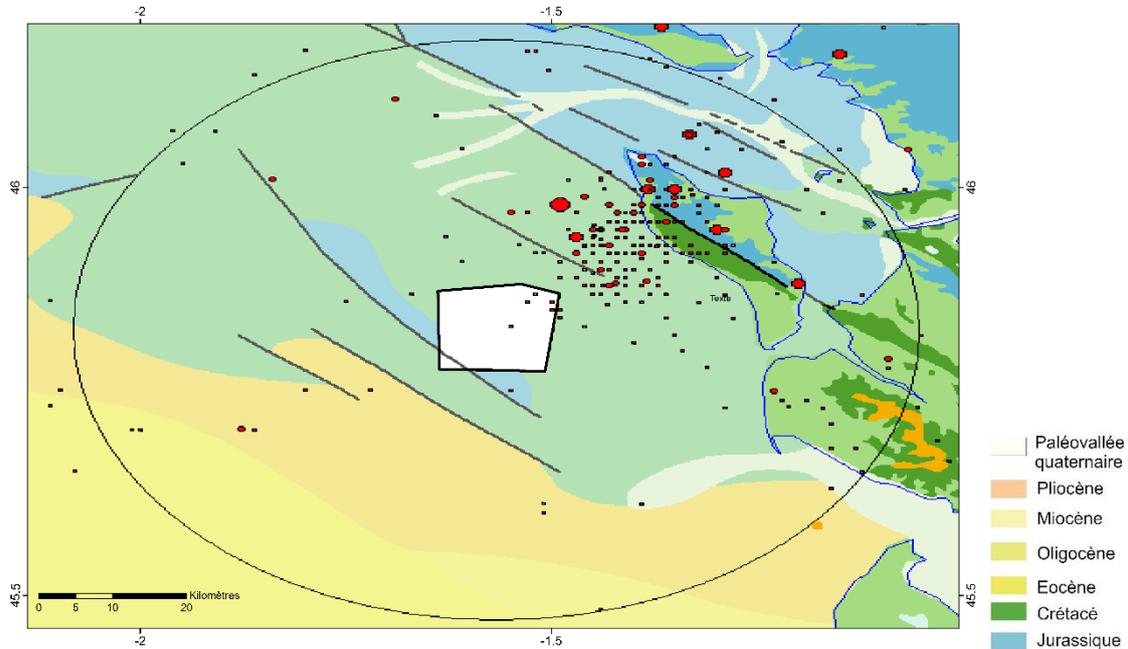


Illustration 7 : Sismicité dans un rayon de 40 km autour du Parc Eolien

Sur l'illustration 7, une grande partie des epicentres n'est connue qu'avec une précision du dixième de degré. Il en résulte sur la carte des pseudos alignements horizontaux qui sont des artefacts et non pas des alignements de sismicité. Il en résulte également que la position de ces séismes à l'intérieur du Parc Eolien reste incertaine ; on ne peut donc pas exclure que la zone de sismicité d'Oléron déborde sur la zone d'implantation des éoliennes.

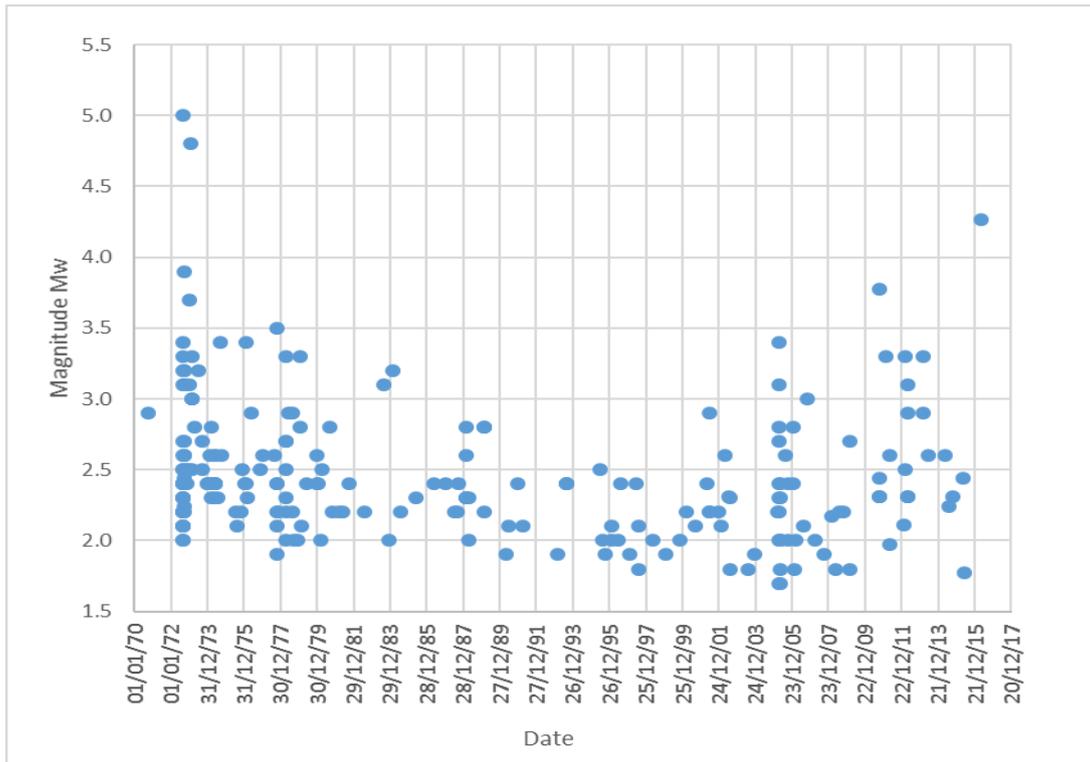


Illustration 8 : Sismicité instrumentale entre 1970 et 2017 dans un rayon de 40 km autour du Parc Eolien

Le tableau de l'illustration 9 indique les principaux séismes de magnitude $M_w \geq 3.5$, largement ressentis sur Oléron et ses environs.

Année	mois	jour	HH	MN	LAT(deg)	LON(deg)	prof(km)	Mw	dist(km)
1706	9	15	3	45	45.883	-1.2	14	4.3	29
1776	4	14	6	nan	46.067	-1.333	14	3.6	32
1805	8	18	6	nan	45.95	-1.3	14	4.3	25
1829	11	27	16	5	46.067	-1.333	14	4.0	32
1829	12	6	5	nan	46.067	-1.333	14	3.6	32
1955	1	7	8	21	46	-1.383	14	4.0	24
1958	7	20	19	27	46	-1.35	16	4.8	26
1972	9	7	22	26	45.98	-1.49	11	5.0	18
1972	9	11	7	48	46.04	-1.39	17	3.9	28
1973	1	6	2	6	45.97	-1.55	11	3.7	16
1973	1	20	10	37	45.94	-1.47	2	4.8	15
1977	10	10	6	5	45.95	-1.44	12	3.5	17
2010	9	28	11	29	45.9503	-1.4136	8.7	3.8	18
2016	4	28	6	46	46.02	-1.29	7	4.3	30

Illustration 9 : Séismes de magnitude ≥ 3.5 dans un rayon de 40 km autour du Parc Eolien.

La crise sismique de 1972 a ainsi été précédée de séismes régulièrement ressentis depuis le XVIIIème siècle (1706, 1776, 1805, 1929, 1955, 1958). Il s'est peut-être produit d'autres

événements largement ressentis dans cette zone avant 1706 mais la période d'exhaustivité du catalogue ne permet pas de le savoir (cf. Illustration 4).

Ces séismes, largement ressentis, n'ont cependant fait aucune victime dans la région. Le plus violent en 1972 a occasionné des dommages légers, de nombreuses chutes de cheminées, mais les dégâts sont restés relativement mineurs.

Un séisme de magnitude Mw 2.5 dans la zone d'implantation des éoliennes n'aurait pas d'impact sur les installations. Ce type de séisme n'est généralement pas ressenti par la population.

Un séisme de magnitude Mw 3.5 survenant dans un rayon de 30 à 40 km est généralement ressenti mais n'est pas susceptible de causer des dommages. Son impact sur une éolienne dans la zone d'implantation serait négligeable.

Un impact sur la zone d'implantation serait à rechercher avec l'occurrence de séismes de magnitudes au moins équivalentes à celui de 1972, voire plus, et sur des distances plus courtes. La période de retour d'un tel scénario n'est pas connue mais probablement supérieure à 475 ans (10% de probabilité sur 50 ans).

Mécanismes au foyer

Les mécanismes au foyer des principaux séismes d'Oléron sont connus notamment d'après les travaux de Nicolas et al. (1990), Mazabraud et al. (2013), Sira et al. (2016). Les directions des plans nodaux principaux sont compatibles avec les directions N100-N120° des accidents hercyniens et du rifting mésozoïque de la région (Illustration 10, Illustration 11).

Les mécanismes sont soit en faille normale (1978, 1984, 2005, 2010) soit en décrochement (1972, 2016).

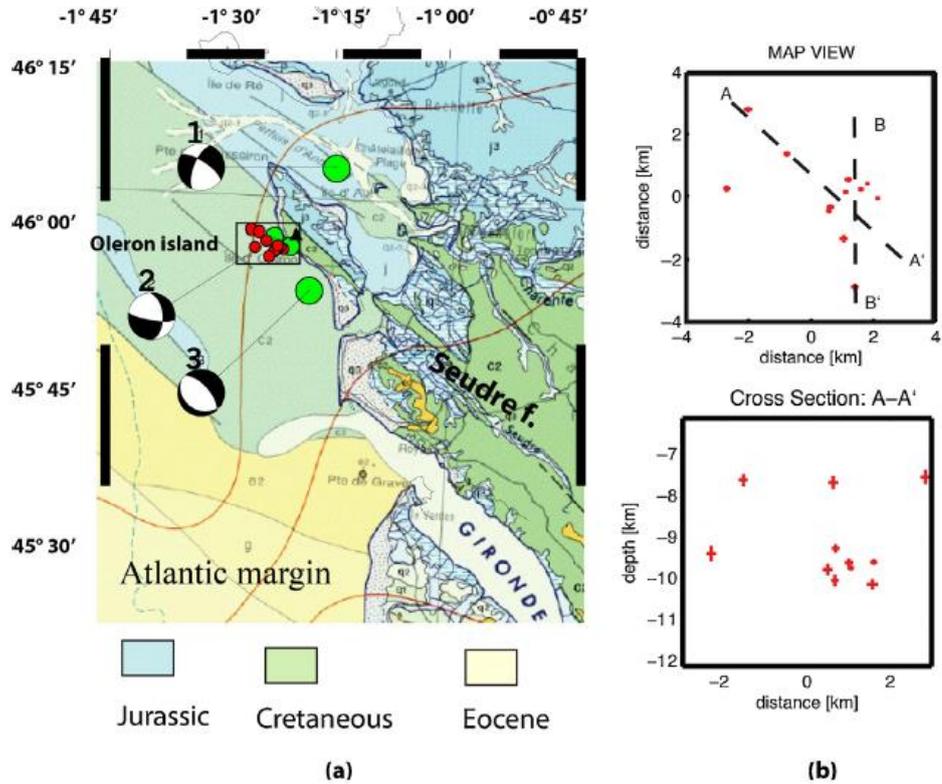


Fig. 2. a: epicentre distribution of the 2005 Oleron sequence, superimposed on the geological map of the Charente region. The Oleron aftershocks swarm is indicated in red, the two events of magnitude higher than 4 in green. The focal solution of the 18 April 2005 event (2) is shown. The location of the 1972 event (1) as well as its focal solution is also shown, as well as those of the 28 September 2010 event (3). See Table 1 for references. The black triangle is the seismological station OLEF, located in the island, just close to the seismogenic zone; b: zoom of the aftershocks swarm, as located with the HypoDD code. Crosses, which are proportional to the errors, denote the location uncertainties. The N120-trending cross-section corresponds to the line A-A'. The line B-B' corresponds to the direction of one nodal plane obtained in the source inversion of the main 18 April 2005 shock.

Illustration 10 : Mécanismes au foyer des séismes de 1972, 2005 et 2010, d'après Mazabraud et al (2013)



Figure 5 - Epicentres des séismes instrumentaux localisés par le LDG depuis 1964 (cercles jaunes), epicentres macrosismiques des séismes historiques (SISFRANCE) (cercles bleus) et mécanisme au foyer du séisme du 28 avril 2016 en noir et blanc selon le CEA (Strike=298, dip=68, rake=173, à partir de la polarité des ondes sismiques). Les mécanismes au foyer des séismes instrumentaux précédemment déterminés dans la région sont en grisé (Nicolas et al., 1990) (d'après CEA-LDG).

Illustration 11 : Mécanismes au foyer de la crise de 1972-1977 (Nicolas et al., 1990) et du séisme du 28 Avril 2016 (mécanisme CEA-LDG dans Sira et al., 2016)

On peut s'étonner que la sismicité d'Oléron reste concentrée dans un secteur réduit à une vingtaine de kilomètres autour de la partie Nord de l'île sans qu'il y ait de signes d'activité notable sur les failles dans leur prolongement Nord-Ouest en mer au Nord de l'île ou au Sud-Est le long de la Seudre.

Les mécanismes au foyer montrent bien une orientation dominante plutôt N120° qui est l'orientation globale des failles dans le secteur. Cependant, avec les quelques mécanismes décrochants évalués suivant un plan nodal de direction N0° à N20°, l'hypothèse d'une structure tectonique non encore connue et ayant ce type d'orientation, n'est pas à exclure.

Sismicité au niveau du Parc Eolien

Le tableau de l'illustration 12 et l'illustration 7 indiquent les séismes localisés à moins de 10 km du point de référence au centre du Parc.

Année	mois	jour	HH	MN	LAT(deg)	LON(deg)	Mw	prof(km)	dist(km)
1972	10	2	22	36	45.75	-1.55	2.4	5	8
1977	10	13	2	32	45.87	-1.52	2.1	3	6
1986	6	4	6	14	45.84	-1.49	2.4	0	6
1987	7	12	15	34	45.89	-1.49	2.2	1	9
1993	2	15	19	20	45.83	-1.46	1.9	19	8
1993	8	25	22	21	45.86	-1.5	2.4	1	6
1995	8	14	13	20	45.86	-1.53	2.0	13	5
1999	1	26	21	23	45.83	-1.55	1.9	1	1
2000	3	13	8	2	45.85	-1.49	2.2	1	7
2000	8	28	3	58	45.85	-1.5	2.1	1	6
2001	6	16	22	58	45.87	-1.67	2.2	15	10
2002	8	14	1	32	45.87	-1.52	1.8	9	6

Illustration 12: Séismes dans la zone du Parc (à moins de 10 km du point central).

Il y a quelques séismes localisés dans les limites du parc éoliens et aux alentours immédiats.

Les évènements recensés sont majoritairement situés au Nord-Est de la zone. Ils sont tous de faible magnitude, inférieure à 2.5. Du fait de fortes incertitudes sur la localisation (jusqu'à 10 km), la position de ces séismes à l'intérieur de zone d'implantation des éoliennes reste incertaine. En conséquence on ne peut pas exclure que cette petite sismicité soit le résultat d'une localisation incertaine de séismes situés en réalité plus au Nord.

A noter qu'aucun séisme n'est survenu dans cette zone depuis 2002. Les données dans cette gamme de magnitude entre 1.5 et 2.5 sont trop peu nombreuses pour en déduire une tendance significative. On avait aussi observé un creux de sismicité entre 1977 et 1987. Cette absence de séisme depuis 2002 peut correspondre à une période calme entre deux périodes de faible activité. Elle peut refléter aussi l'amélioration de la localisation des petits séismes ces dernières années. Le recul sur les observations reste suffisant pour conclure.

2.3. LES FAILLES AUTOUR DU SITE

Les éléments structuraux reportés sur l'illustration 13 sont extraits de la carte géologique au million. Le schéma structural sera revu et actualisé dans le livrable du lot 5.

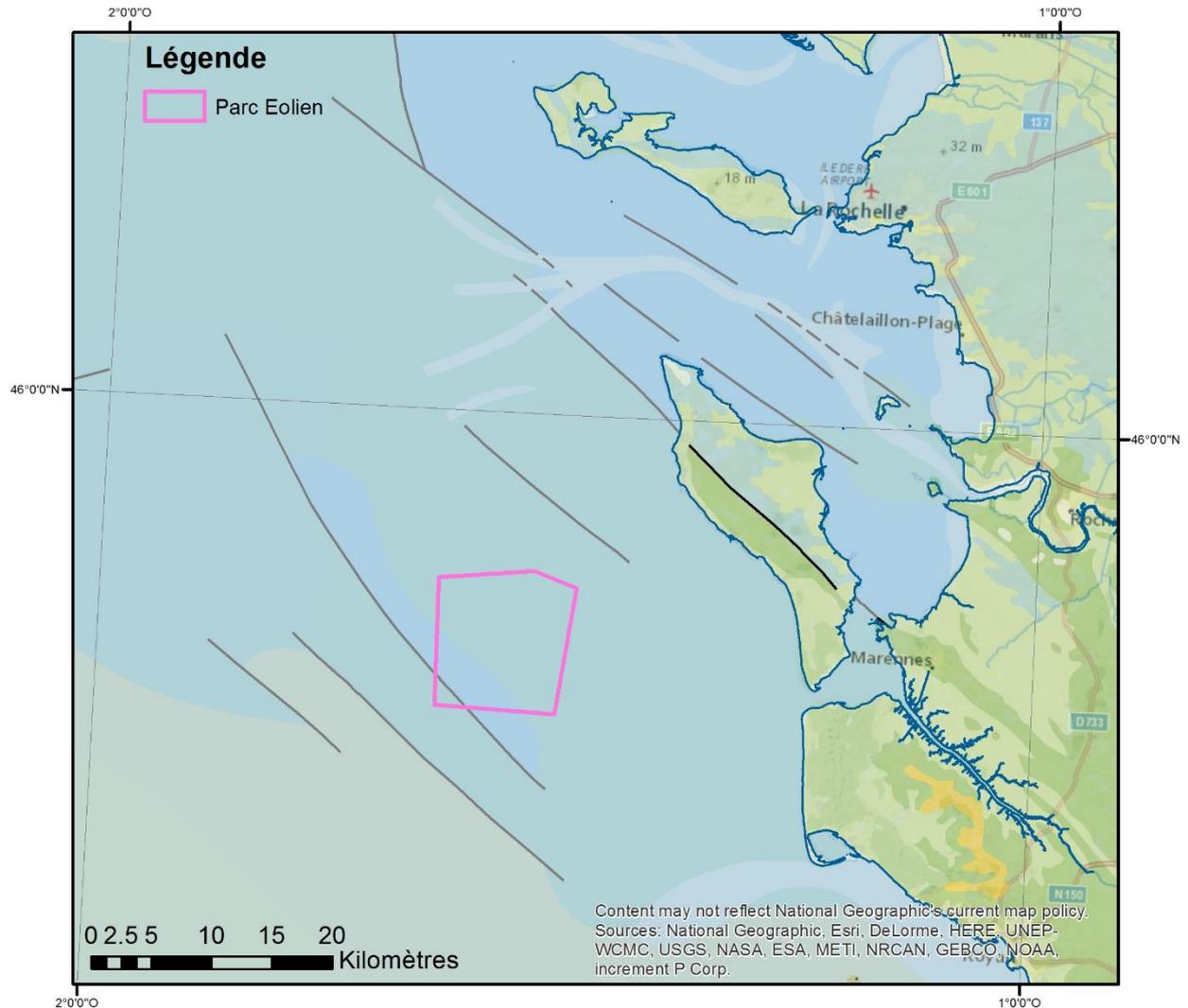


Illustration 13 : Eléments linéaires structuraux autour du site d'après la carte au 1 : 1 000 000 de Chantraine et al (2003)

Une faille en mer traverserait la partie Sud de la zone du Parc. Ceci sera à vérifier lors des travaux pour le lot 5 de cette étude, en particulier si son existence est confirmée et si un tracé plus précis est possible.

3. Etat des lieux sur les normes parasismiques

3.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE GENERAL

3.1.1. Le cadre réglementaire pour l'éolien

Le cadre pour l'éolien terrestre peut être consulté sur le lien :

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eolien-terrestre#e3>

Les normes parasismiques n'y sont pas mentionnées. Il faut néanmoins en tenir compte dans la législation des installations classées pour la protection de l'environnement et pour le permis de construire.

Pour l'éolien en mer, le lien ci-dessous donne des informations :

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eolien-en-mer#e6>

Concernant la réglementation parasismique, il n'existe pas de réglementation spécifique (pas d'arrêté spécifique pour ce type d'installation). Il faut donc pouvoir relier une installation éolienne à une catégorie réglementaire de bâtiments ou d'installations pour définir quel texte réglementaire doit être suivi pour la prise en compte du risque sismique.

3.1.2. Rappels de Principes généraux de la réglementation parasismique

La réglementation parasismique définit des règles de construction spécifiques à chaque ouvrage, tenant compte à la fois de l'exposition à l'aléa sismique et du type d'ouvrage considéré.

Les articles R.563-1 à R.563-8 du Code de l'Environnement répartissent les équipements, bâtiments et installations en deux classes :

- la classe dite à « risque normal », qui comprend les bâtiments, équipements et installations pour lesquels les conséquences d'un séisme demeurent circonscrites à leurs occupants et à leur voisinage immédiat. Dans ce cas, l'objectif de la réglementation parasismique est la sauvegarde des vies humaines pour une secousse dont le niveau d'agression est fixé pour chaque zone de sismicité. La construction peut alors subir des dommages irréparables, mais elle ne doit pas s'effondrer sur ses occupants. En cas de secousse plus modérée, l'application des dispositions définies dans les règles parasismiques permet de limiter les destructions et, ainsi, les pertes économiques.
- la classe à « risque spécial », qui comprend les bâtiments, équipements et installations pour lesquels les conséquences d'un séisme ne sont pas circonscrites à leur voisinage immédiat (article R.563-6 du Code de l'Environnement). Un objectif supplémentaire est d'éviter les conséquences de perturbations ou de dommages liés au séisme sur le voisinage de l'installation (conséquences sur la sécurité, la santé des personnes, sur l'environnement...).

Pour des explications détaillées, il est possible de se référer au site du Plan Séisme à :

<http://www.planseisme.fr/-Regles-parasismiques-applicables-aux-differents-ouvrages-.html>

Les textes applicables sont définis sur l'illustration 14 ci-dessous :

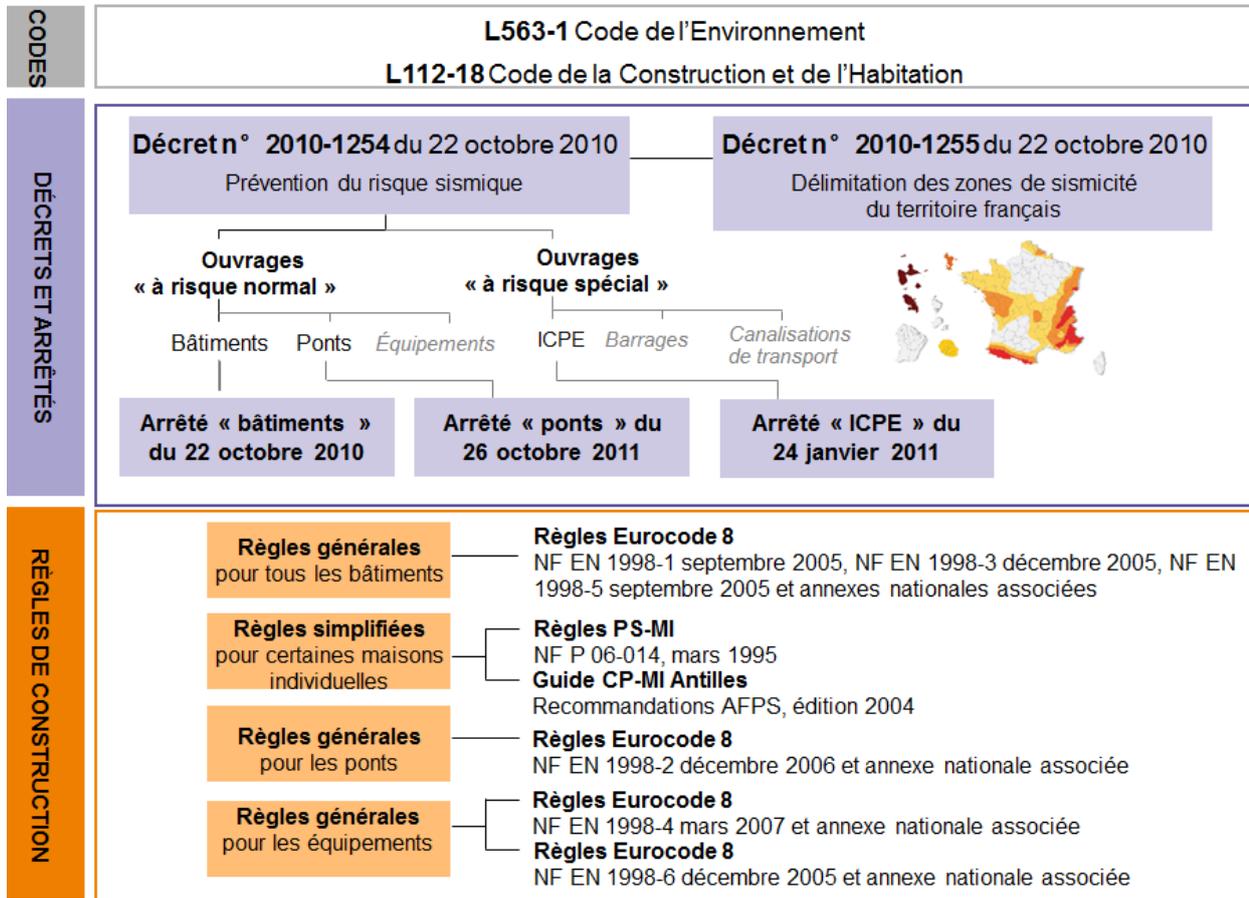


Illustration 14 : Textes réglementaires pour la construction parasismique en France (d'après www.planseisme.fr)

Pour la réglementation applicable aux bâtiments à risque normal, il est possible de consulter :

<http://www.planseisme.fr/Regles-parasismiques-applicables-aux-batiments-a-risque.html>

Et pour la réglementation applicable aux Installations Classées Pour l'Environnement à risque spécial, il est possible de consulter la page suivante :

<http://www.planseisme.fr/ICPE-a-risque-special-1476.html>

3.1.3. Attestations parasismiques pour les demandes de permis de construire en domaine terrestre.

Au niveau de la réalisation d'un projet de construction, le maître d'ouvrage devra fournir une attestation d'un contrôleur technique certifiant qu'il a pris en compte ses avis sur le respect des règles parasismiques et paracycloniques.

Les modalités d'application sont précisées dans l'arrêté du 10 septembre 2007 relatif aux attestations de prise en compte des règles de construction parasismique. Cet arrêté définit deux types d'attestations, à fournir respectivement lors du dépôt d'une demande de permis de construire et lors de la déclaration d'achèvement de travaux. Ces attestations ne peuvent être délivrées que par des contrôleurs techniques titulaires d'un agrément ministériel.

Le contrôleur technique intervient à la demande du maître d'ouvrage pour contribuer à la prévention des aléas techniques (notamment solidité et sécurité). Pour les bâtiments présentant un enjeu important vis-à-vis du risque sismique (article R111-38 du CCH), le contrôle technique est obligatoire et la mission parasismique PS doit accompagner les missions de base solidité L et sécurité S.

Rappel (art. R111-38 du Code de la Construction et de l'Habitation)

Sont soumises obligatoirement au contrôle technique prévu à l'article L. 111-23 les opérations de construction ayant pour objet la réalisation :

- [...]
- 6°) *d'éoliennes dont la hauteur du mât et de la nacelle au-dessus du sol est supérieure ou égale à 12 mètres*

3.2. CLASSEMENT DES CATEGORIES D'EOLIENNES ET REGLEMENTATION APPLICABLE EN DOMAINE TERRESTRE

On distingue trois cas selon la hauteur et la puissance des éoliennes considérées :

- Cas des éoliennes inférieures à 12 m (pas de permis de construire). Les éoliennes ne sont pas soumises à une réglementation spécifique. Il y a néanmoins obligation de respecter l'arrêté du 22 octobre 2010 (bâtiment « à risque normal ») comme tout bâtiment de catégorie d'importance III.
- Cas des éoliennes de hauteur comprise entre 12 et 50 m, de puissance inférieure à 20 MW. Les éoliennes sont des ICPE soumises à déclaration à la préfecture. Obligation de respecter l'arrêté du 22 octobre 2010 (bâtiment « à risque normal ») comme tout bâtiment de catégorie d'importance III (voir ci-dessous).
- Cas des éoliennes de hauteur supérieure à 50 m, de puissance supérieure à 20 MW. Les éoliennes sont des ICPE soumises à autorisation par la préfecture. Obligation de respecter l'arrêté du 24 janvier 2011 (bâtiment « à risque spécial ») comme toutes les ICPE soumises à autorisation (voir ci-dessous).

Le décret d'application du 23 août 2011 a créé la rubrique 2 980 dédiée aux éoliennes au sein de la nomenclature relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Sont soumises au régime de l'autorisation les installations d'éoliennes comprenant :

- **au moins un aérogénérateur dont le mât a une hauteur supérieure ou égale à 50 mètres,**

- **des aérogénérateurs d'une hauteur comprise entre 12 et 50 mètres et d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW.**

Références réglementaires :

- Décret n° 2011-984 du 23 août 2011 modifiant la nomenclature des installations classées
- Décret n° 2011-985 du 23 août 2011 pris pour l'application de l'article L. 553-3 du code de l'environnement
- Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à déclaration au titre de la rubrique 2 980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement.
- Arrêté du 26 août 2011 relatif à la remise en état et à la constitution des garanties financières pour les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent.
- Circulaire du 29 août 2011 relative aux conséquences et orientations du classement des éoliennes dans le régime des installations classées.

3.2.1. Eoliennes assimilées à des bâtiments à « risque normal » :

L'arrêté du 22 octobre 2010 (modifié le 15 Septembre 2014) relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »

Sont en catégorie d'importance III :

[...]

Les bâtiments des centres de production collective d'énergie répondant au moins à l'un des trois critères suivants, quelle que soit leur capacité d'accueil :

- *la production électrique est supérieure au seuil de 40 MW électrique ;*
- *la production thermique est supérieure au seuil de 20 MW thermique ;*
- *le débit d'injection dans le réseau de gaz est supérieur à 2 000 Nm³/h*

Non reproduit ici dans son intégralité, l'arrêté donne ensuite les spécifications techniques à respecter (spectre de réponse en accélération) pour le dimensionnement des éoliennes « à risque normal ».

Les « bâtiments de centres de production collective d'énergie » visés par l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié ne correspondent qu'aux bâtiments dont la fonction première est la production collective d'énergie. Les bâtiments techniques associés aux éoliennes, centrales électriques et photovoltaïques, réseaux de chaleur..., dont l'endommagement empêcherait le fonctionnement du centre de production, sont des bâtiments de catégorie d'importance III. Par contre, les équipements eux-mêmes (l'éolienne par exemple ou la centrale photovoltaïque) ne sont pas

l'objet de l'arrêté bâtiment. (cf. <http://www.planseisme.fr/Quels-sont-les-batiments-des-centres-de-production.html>)

3.2.2. Eoliennes assimilées à des bâtiments à « risque spécial » :

Arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation

Article 1 - Sauf mention contraire dans les articles concernés, le présent arrêté est applicable à l'ensemble des installations classées soumises à autorisation.

SECTION II : DISPOSITIONS RELATIVES AUX REGLES PARASISMIQUES APPLICABLES A CERTAINES INSTALLATIONS

Cette section reprend intégralement l'arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées.

Non reproduit ici, l'arrêté donne les spécifications techniques à respecter (spectre de réponse) pour le dimensionnement des « éoliennes à risque spécial ».

3.3. CAS DES ÉOLIENNES OFFSHORES :

Article R421-8-1 créé par Décret n°2012-41 du 12 janvier 2012 - art. 1

« En application de l'article L. 421-5, sont dispensées de toute formalité au titre du présent code, en raison de leur nature et de leur implantation sur le domaine public maritime immergé au-delà de la laisse de la basse mer, les installations de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable, y compris leurs ouvrages de raccordement aux réseaux publics d'électricité, notamment les éoliennes, les hydroliennes, les installations houlomotrices et marémotrices ainsi que celles utilisant l'énergie thermique des mers. ».

Ainsi les éoliennes offshore semblent pour leur part échapper aux réglementations, dont la réglementation parasismique.

Les éoliennes envisagées dans les parcs offshore sont des éoliennes de grande taille (100-200 m). Selon ces critères de taille, s'il s'agissait d'installations terrestres, les normes parasismiques à appliquer sont celles d'installations ICPE à risque spécial. Une étude spécifique d'aléa sismique doit alors considérer une accélération de sol avec une période de retour de 3000 à 5000 ans au lieu de 475 ans pour du risque normal, ce qui est beaucoup plus contraignant en terme de dimensionnement de structure.

Deux questions peuvent se poser :

- Faut-il appliquer la réglementation d'ICPE à risque spécial en offshore ?
- La zone sismique réglementaire de la région (zone de sismicité 3) s'applique-t-elle en offshore ?

3.4. BILAN

Il n'existe pas de réglementation spécifique (pas d'arrêté spécifique) pour ce type d'installation.

Les différentes installations terrestres sont soumises à la réglementation parasismique pour les bâtiments « à risque normal » (éoliennes inférieures à 12 m ; éoliennes de 12 m à 50 m ou 20 MW = ICPE soumise à déclaration) ou « à risque spécial » (éoliennes supérieures à 50 m ou 20 MW = ICPE soumises à autorisation).

Une attestation de prise en compte du risque sismique (car obligation de permis de construire) est demandé pour les éoliennes de plus de 12 m.

Les éoliennes offshore et à terre ne sont pas soumises à la même réglementation. La réglementation parasismique a été mise en place pour des bâtiments et installations terrestres, prenant en compte les habitations avoisinantes et des limites territoriales administratives. Son application stricte en domaine offshore n'est actuellement pas adaptée.

3.5. RECHERCHE DE GUIDES OU NORMES CONCERNANT LES EOLIENNES

3.5.1. Guides techniques français

Des guides techniques existent pour les études de danger et les études d'impact. On peut citer :

Guide technique : élaboration de l'étude de dangers dans le cadre des parcs éoliens (Mai 2012) :

Ce guide vise à accompagner les différents acteurs de l'éolien dans la démarche d'évaluation des risques potentiels liés à un parc éolien => recommandations générales et en particulier rappel de la réglementation.

Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres

Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens en mer (2017)

Ces deux guides s'adressent à l'ensemble des acteurs concernés par les projets éoliens et l'évaluation environnementale, afin de faciliter le dialogue sur des bases objectives. Il n'y est cependant fait aucune mention au risque sismique

NF EN 61400-1 Eoliennes – Partie 1 : Exigences de conception, Juin 2006

Ce guide semble être le même que celui décrit ci-dessus mais référencé selon la nomenclature de l'AFNOR.

3.5.2. Guides techniques internationaux

On peut citer:

International Electrotechnical Commission, IEC 61400 Ed. 3: Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2005. (document payant)

Il s'agit du guide le plus utilisé dans le monde pour le dimensionnement d'éoliennes. Le paragraphe §11.6 "Assessment of earthquake conditions" traite du risque sismique (nous n'avons pas pu y avoir accès mais il est noté dans un article que « There is no detailed design standard for earthquake resistance in the IEC standard, IEC 61400-1 »).

Dans une autre publication il est noté :

"The IEC requirements [...] state that earthquake effects should only be taken into account on sites where earthquake assessment analysis is required according to local building codes. For such cases, the required return period for the design event is 475 years. The analysis [...] should be performed according to the local seismic code, or by taking into account a modal mass of 85% of the total turbine mass if such code is missing. A simplified analysis approach is suggested, where the load for the system should be calculated using a concentrated mass at the tower head and an acceleration from the design response spectrum (calculated with a damping ratio of 1%) of the first eigenfrequency of the tower. This load should be added the highest load between both the normal power production and emergency stop load cases".

Germanischer Lloyd, Guideline for the certification of offshore wind turbines, 2005.

Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy and Det Norske Veritas, Guidelines for design of wind turbines, 2002.

American Society of Civil Engineers and American Wind Energy Association, Recommended practice for compliance of large land-based wind turbine support structures, 2011.

Japan Society of Civil Engineers, Guidelines for Design of Wind Turbine Support Structures and Foundations, Tokyo: Task Committee on Dynamic Analysis and Structural Design of Wind Turbine Committee of Structural Engineering, 2010.

A noter également la norme ISO 19901 (référence ci-dessous) qui définit les critères et procédures de dimensionnement parasismique en offshore pour les installations pétrolières et gazières. En l'absence d'étude d'aléa sismique spécifique au site, l'annexe de ce document donne des niveaux de dimensionnement minimum à prendre en compte (accélérations spectrales pour les périodes 0.2s et 1.0s et pour un amortissement de 5%. Sur les côtes françaises, l'annexe préconise des valeurs d'accélérations de 0.25g à 0.2s et de 0.1g à 1.0s, équivalent à une accélérations pga de 0.1g).

ISO 19901-2:2017 Petroleum and natural gas industries -- Specific requirements for offshore structures -- Part 2: Seismic design procedures and criteria

3.5.3. Sélection de travaux scientifiques

Les références ci-dessous sont des listes non-exhaustives de publications scientifiques se rapportant au dimensionnement parasismique d'éoliennes. La première référence indiquée est une thèse récente qui se rapporte aux éoliennes en mer. Le chapitre 2 fait un point sur les codes existants pour l'Europe et le Japon. L'article de Matsunobu et al (2014) indique la bonne tenue d'un parc éolien en mer au Japon durant le séisme et le tsunami de Mars 2011.

Maria Luisa Rosales Gonzalez (2016) - Seismic Analysis on Monopile Based Offshore Wind Turbines Including Aero-elasticity and Soil-Structure Interaction. Master of Science Thesis Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology

N. Alati, G. Failla, and F. Arena, (2015). Seismic analysis of offshore wind turbines on bottom-fixed support structures, Philosophical Transactions of the Royal Society

I. C. Sapountzakis, Evangelos J. and Dikaros, A. E. Kampitsis, and A. D. Koroneou, (2015). Nonlinear response of wind turbines under wind and seismic excitations with soil-structure interaction, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics

D. H. Kim, S. G. Lee, and I. K. Lee (2014). Seismic fragility analysis of 5 MW offshore wind turbine, Renewable Energy. 65 250-256.

Matsunobu T., Inoue S., Tsuji Y., Yoshida K., Komatsuzaki M (2014) Seismic Design of Offshore Wind Turbine Withstands Great East Japan Earthquake and Tsunami. Journal of Energy and Power Engineering 8 (2014) 2039-2044

Otoniel Díaz and Luis E. Suárez (2014) Seismic Analysis of Wind Turbines. Earthquake Spectra: May 2014, Vol. 30, No. 2, pp. 743-765.

R. A. Kjørhaug, A. M. Kaynia, and A. Elgamal, (2014) Seismic response of wind turbines due to earthquake and wind loading, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014

B. Song, Y. Yi, and J. C. Wu, (2013) Study on seismic dynamic response of offshore wind turbine tower with monopile foundation based on M method, Advanced Materials Research.

M. Hongwang, (2012). Seismic analysis for wind turbines including soil-structure interaction combining vertical and horizontal earthquake, 15th World Conference on Earthquake Engineering

K. Haciefendioglu, (2010) Stochastic seismic response analysis of offshore wind turbine including fluid-structure-soil interaction, The Structural Design of Tall and Special Buildings.

X. Zhao and P. Maißer, (2006). Seismic response analysis of wind turbine towers including soil structure interaction, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics

3.5.4. Retour d'expérience sur l'Europe du Nord

Peu d'informations sont disponibles pour l'instant sur l'application de normes parasismiques sur les parcs éoliens installés actuellement en Europe du Nord. Si les recommandations du guide IEC (NF EN 61400-1) sont suivies, des normes parasismiques sont à prendre en compte seulement dans les zones de sismicité active. Mais les zones offshore de l'Europe du Nord sont plutôt en zone de sismicité faible. Les valeurs d'accélération données en annexe de l'ISO 19901-2:2017 pour les installations pétrolières sont inférieures à celles données pour la côte Atlantique française.

4. Aide et Piste

En France, l'objectif de la réglementation parasismique est tout d'abord la sauvegarde des vies humaines pour les Ouvrages à Risque Normal (ORN), avec en plus la prise en compte des conséquences sur le voisinage pour les ouvrages à Risque Spécial (ORS). Dans ce cadre, une éolienne en mer est une installation inoccupée de façon permanente ou même temporaire (en dehors des phases de construction et de réparation) sans impact humain en cas de dommages liés aux séismes. La décision de dimensionner des éoliennes en mer au séisme relève d'une préoccupation matérielle.

Dans les guides internationaux et la littérature scientifique, le dimensionnement parasismique d'éoliennes en mer est pris en compte essentiellement dans les zones sismiques actives. Par ailleurs, l'estimation de l'aléa est généralement réalisée pour une période de retour de 475 ans (10% de probabilité d'occurrence ou de dépassement sur 50 ans) ce qui est le cas pour la réglementation parasismique des ORN en France.

Par contre pour des ORS, la période de retour de référence est de l'ordre de 5000 ans ce qui est beaucoup plus contraignant en terme de dimensionnement parasismique. Une application en offshore de la réglementation onshore correspondrait à un niveau de protection très conservateur. Il n'y a aucune obligation réglementaire à ce sujet, et le choix du niveau de protection revient au constructeur.

Par extrapolation en mer du zonage sismique de la France, le parc éolien d'Oléron, serait rattaché à la zone de sismicité 3 du zonage sismique réglementaire, ce qui impose une valeur d'accélération au rocher de 1.1 m/s^2 à prendre en compte pour un bâtiment de catégorie d'importance II. Mais seule une réglementation peut imposer un seuil d'accélération forfaitaire pour une prise en compte de l'aléa sismique sur un site, ce qui n'est pas le cas : la réglementation actuelle n'impose rien en mer.

S'agissant d'éoliennes de grande hauteur et si un dimensionnement parasismique est envisagé, il dépendra aussi du type de fondation (fondation au sol ou éoliennes flottantes). Il conviendra de vérifier si le chargement lié au vent et celui lié aux vagues n'est pas suffisant par rapport à une accélération au rocher qui comparativement, reste modérée.

Parmi les effets envisagés pour l'aléa sismique on peut citer :

- La possibilité de liquéfaction des sols au niveau des fondations ;
- La possibilité de vagues de tsunami ;
- La possibilité de rupture en surface de faille active au niveau de la zone du parc.

Des effets significatifs sont à envisager pour des séismes de magnitude supérieure à 6.0 et, plus particulièrement pour le tsunami, avec la possibilité de mouvements verticaux générés par des séismes en mer.

La dimension des failles en mer dans le secteur d'Oléron n'est pas incompatible avec des séismes de magnitude 6.0 ou plus. Le séisme de Bouin en 1799 à 130 km du site était de magnitude 6.3. Mais la période de retour de tels séismes dans ce contexte de sismicité modérée est sans doute de plusieurs milliers d'années.

Si l'hypothèse d'un séisme de grande dimension est envisageable, on peut se demander si l'enjeu lié à des éoliennes en mer mérite qu'un phénomène qualifié d'extrême soit pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages.

L'analyse a par ailleurs montré la présence possible d'une faille dans la délimitation prévue pour le parc éolien. Des petits séismes indiquent la possibilité d'une activité sismique locale. Une caractérisation plus précise de la présence d'une faille sur le site est d'autant plus souhaitable qu'il s'agit d'une zone privilégiée d'instabilité de terrain. L'état de connaissance de la sismicité de ce secteur est faible mais la région reste néanmoins dans un contexte de sismicité modérée. Pour une période de retour de 475 ans (conseillée pour une prise en compte des effets de séisme) des séismes de magnitude de l'ordre 5.0 donnant des ruptures en surface négligeables sont attendus. Dans l'état actuel des connaissances, le risque de rupture en surface lié à une faille active dans les limites de la zone est très faible. Mais l'état de connaissance de la sismicité et de la tectonique régionale est lui aussi faible et doit être amélioré.

Si pour les éoliennes en mer, la réglementation parasismique en vigueur n'impose aucune contrainte constructive, il n'en est pas de même pour les installations à terre liées au parc Eolien. La zone d'atterrissage est soumise à la réglementation parasismique. Le poste de transformation électrique est une installation de risque normal de catégorie d'importance III (bâtiments de centres de production collective d'énergie avec une production électrique supérieure au seuil de 40 MW électrique, quelle que soit sa capacité d'accueil) qu'il convient de dimensionner selon les règles imposées par la réglementation pour ce type d'installations.

5. Bibliographie

- Arroucau P.. (2006). *Sismicité du Massif Armoricaïn : relocalisations et interprétation tectonique*. Thèse Université de Nantes, 190 p., 3 Ann.
- Brun J.P. et J.P. Burg.(1982) *Combined thrusting and wrenching in the Ibero-Armorican arc*. *Earth planet. Sci. Lett.*, 61, 319–332.
- Cara, M., Cansi, Y., Schlupp, A. et al., (2015) *SI-Hex: a new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan France*. *Bull. Soc. géol. France*, 186, n° 1, pp. 3-19.
- Chantraine J., Autran A., Cavellier C., et coll. (2003) *Carte géologique de la France à l'échelle du millionième*, 6e édition révisée. BRGM, Orléans.
- Gölke, M. & Coblenz, D. (1996) *Origins of the European regional stress field*, *Tectonophysics*, 226, 11–24.
- Manchuel K., Traversa P., Baumont D., Cara M., Nayman E., Durouchoux C. (2017) *The French Seismic CATalogue (FCAT-17)* *Bull Earthquake Eng.* DOI 10.1007/s10518-017-0236-1.
- Mazabraud, Y., N. Bethoux, B. Delouis (2013) *Is earthquake activity along the French Atlantic margin favoured by local rheological contrasts?*, *Comptes Rendus Géoscience*, 345 (9-10), 373-382, doi :10.1016/j.crte.2013.07.004.
- Montadert, L., D.G. Roberts, G. A. Auffret, W. Bock, P.A. DuPeuble, E.A. Hailwood, W. Harrison, H. Kagami, D.N. Lumsden, C. Muller, D. Schnitker, R.W. Thompson, T.L. Thompson et P.P. Timofeev. (1977) *Rifting and subsidence on passive continental margins in the North East Atlantic*. *Nature*, 268, 305–309.
- Nicolas, M., Santoire, J.P., Delpéch, P.Y. (1990) *Intraplate seismicity: new seismotectonic data in Western Europe*. *Tectonophysics* 179, 27–53.
- Nocquet, J.M. (2012) *Present-day kinematics of the Mediterranean : a comprehensive overview of GPS results*. *Tectonophysics*, 579, 220-242.
- Rolet J.. (1994) *The Armorican Massif, Structure and Metamorphism, Introduction*. in *Pre-Mesozoic Geology in France and Related Areas*, pp. 177–178, ed. Keppe, J., Springer Verlag, Berlin.
- Sira C., A. Schlupp, M. Schaming, M. Granet (2010) – *Séisme de Fontenay-le-Comte du 30 juin 2010, Synthèse sismologique et étude macrosismique, rapport BCSF, BCSF2010-R2*, 30 p., 11 fig., 6 annexes.
- Sira C., A. Schlupp, M. Schaming (2016) – *Séisme de La Rochelle du 28 avril 2016, Rapport du BCSF, BCSF2016-R1*, 82 p., 50 figures, 4 annexes.
- Vignerresse J.L.. (1988) *La fracturation post-hercynienne du Massif Armoricaïn d'après les données géologiques*, *Géol. Fr.*, 4, 3–10.

Annexe 1

Séismes de magnitude $M_w \geq 3.0$ à moins de 150 km du site

Année	Mois	Jour	HH	MN	SEC	LAT(deg)	LON(deg)	Prof.(km)	Mw	dist(km)
1014						45.65	0.15	14	5.4	135
1208	6	13				45.75	0.083	14	5.0	128
1512	8	25				46.42	-0.2	14	3.6	124
1568	10	26				46.25	-0.32	14	4.6	107
1591	4	24	12			46.2	-1.37	14	4.3	44
1593	11	19	15			46.17	-1.15	14	4.0	50
1605	8	24	19			46.17	-1.15	14	4.3	50
1619	8	11	11			46.82	-1.05	14	4.3	117
1639	2	16	11			46	-0.9	14	4.0	55
1648	7	30	20			45.95	-0.88	14	4.0	55
1663	1	14	0	5		46.95	-0.75	13	5.3	140
1704	1	10	18			46.05	-1.07	14	3.6	46
1706	9	15	3	45		45.88	-1.2	14	4.3	29
1735	5	31	21	30		46.07	-0.95	14	3.6	55
1746	9	7	0	5		44.88	-0.43	11	3.7	137
1747	8					47	-2.25	14	4.3	141
1756	2	3	17	45		46.03	-0.63	14	4.7	76
1759	8	10	22	10		44.88	-0.42	11	5.4	138
1759	8	16	19			44.88	-0.42	11	3.7	138
1767	4	7	1	30		47.03	-1.95	14	4.7	137
1770	11	24	23			46.45	-1.25	14	4.0	74
1772	1	2	6			46.65	-0.25	14	4.3	136
1772	1	9	7			46.65	-0.25	14	5.7	136
1772	1	9	9			46.65	-0.25	14	3.8	136
1776	4	14	6			46.07	-1.33	14	3.6	32
1776	4	30	5	20		46.37	-1.32	16	4.5	63
1779	11	2	19	15		46.4	-0.05	14	3.7	133
1780	5	2	3	20		46.45	-1.3	15	5.1	72
1798	2	1	22	30		46.3	-0.8	14	3.7	79
1799	1	25	3	45		46.97	-2.1	21	6.3	133
1799	1	27	5			46.98	-1.9	14	3.6	131
1799	2	5	12	18		46.98	-1.9	14	3.6	131
1799	2	6	14	10		46.98	-1.9	14	3.6	131
1803	4	29	23	30		46.52	-0.53	14	3.8	110
1805	8	18	6			45.95	-1.3	14	4.3	25
1808	3	4	17	20		46.7	-2.33	14	4.7	113
1810	8	31	7	55		46.47	-0.55	17	4.6	106
1817	9	22	2	30		45.65	0.15	14	3.6	135
1822	5	31	7			46.93	-0.93	16	4.9	132
1829	11	27	16	5		46.07	-1.33	14	4.0	32
1829	12	6	5			46.07	-1.33	14	3.6	32
1833	2	5	5			47	-2.25	14	4.0	141
1835	9	14	16	30		46.12	0.133	14	4.7	135
1836	5	13	5	3		46.5	-0.53	17	4.8	109
1836	5	13	14			46.5	-0.53	14	4.1	109
1836	5	13	22	30		46.5	-0.53	14	3.8	109
1838	1	8	21			46.38	-0.9	14	3.5	80

Année	Mois	Jour	HH	MN	SEC	LAT(deg)	LON(deg)	Prof.(km)	Mw	dist(km)
1838	12	21	20			46.17	-1.15	14	4.0	50
1852	1	26	2	16		44.9	-0.48	13	4.6	133
1852	5	26	0	30		46.67	-1.43	14	4.0	94
1853	12	21	19	3		46.5	-2.25	17	4.8	91
1866	9	1	20	30		46.42	-0.2	14	4.3	124
1866	9	23	23			45.85	-0.53	14	4.3	80
1869	5	23	1	50		46.58	-0.17	16	4.6	136
1874	4	15	6	30		45.45	-0.43	17	3.8	98
1876	11	13	17	30		46.87	-0.65	14	3.6	135
1877	3	14	16			46.98	-1.32	14	3.6	130
1882	7	26	15	38		45.75	-0.63	14	4.6	73
1883	8	9	3			46.17	-0.22	14	4.0	111
1885	2	6	18	30		45.87	-0.55	16	4.2	79
1885	4	5	5			46.83	-0.27	14	4.0	149
1886	5	11	18	45		46.98	-1.52	14	3.6	129
1887	6	12	11	15		46.6	-1.3	16	3.9	89
1887	7	29	1			46.65	-1.07	14	3.6	99
1887	8	2	22			46.65	-1.07	16	3.9	99
1889	8	12	2	40		46.47	-0.63	17	4.6	101
1896	9	20	4	10		46.97	-1.5	13	3.9	127
1897	1	29	1	50		45.97	-0.45	17	4.3	88
1898	1	26	6	40		46.83	-0.87	15	3.8	124
1903	10	27	2	30		46.23	-1.13	11	4.4	56
1904	2	13	22	30		46.93	-0.78	15	4.1	137
1905	11	6	19	53		47.02	-1.67	14	3.6	133
1905	11	25	10	57	52.0	45.8	0.133	17	4.3	132
1908	5	31	22	9		46.75	-2.13	14	3.5	112
1909	6	23	19	43		46.87	-1.23	10	3.7	119
1916	12	31	21	55		46.6	-1.22	16	4.2	90
1927	10	1	1	30		47.03	-1.75	14	3.9	135
1935	7	18	13	15		45.8	0.133	9	3.6	132
1935	8	19	18	32		45.75	0.067	8	3.8	127
1935	9	28	16	17	50.0	45.77	-0.03	8	4.9	119
1935	10	15	23	45		45.83	0	9	3.5	121
1935	10	20	22	37		45.77	0.1	9	3.6	129
1935	11	14	5	37		45.78	0.1	15	4.0	129
1936	1	17	0	14		45.75	-0.02	13	3.9	120
1936	2	26	17	58		45.75	-0.07	15	3.8	117
1936	8	24	22	10		45.68	0.133	15	3.7	133
1939	12	13	4	3		45.9	-0.08	14	4.0	115
1945	10	15	21	48		46.97	-2.15	16	4.2	134
1946	1	15	3	20		46.77	-1.82	15	3.7	106
1950	10	7	13	34	22.0	46.67	-1.33	16	3.8	95
1955	1	7	8	21	20.0	46	-1.38	14	4.0	24
1958	7	20	19	27	15.0	46	-1.35	16	4.8	26
1962	2	2	3	26	4.0	46.05	-0.4	10	3.7	93
1965	5	12	17	14	46.7	47.07	-2.25	13	3.0	148
1968	3	15	13	44	27.1	46.97	-1.96	9	3.4	131
1968	3	15	13	45	57.4	46.94	-1.79	11	4.1	125
1968	3	24	19	51	37.9	46.95	-1.89	12	3.2	127
1971	11	30	5	23	20.0	46.8	-2.07	4	3.4	115
1972	9	7	22	26	56.6	45.98	-1.49	11	5.0	18
1972	9	8	1	51	51.7	46.01	-1.38	18	3.2	25
1972	9	8	8	1	26.3	45.97	-1.4	9	3.1	21

Année	Mois	Jour	HH	MN	SEC	LAT(deg)	LON(deg)	Prof.(km)	Mw	dist(km)
1972	9	8	9	20	12.6	45.94	-1.47	3	3.4	15
1972	9	9	2	48	5.4	46.03	-1.39	11	3.3	27
1972	9	11	5	1	48.7	45.97	-1.42	9	3.2	20
1972	9	11	7	48	35.7	46.04	-1.39	17	3.9	28
1972	9	22	10	47	16.6	45.9	-1.44	6	3.2	13
1972	9	25	17	51	27.0	45.95	-1.29	6	3.1	25
1972	10	2	10	39	12.9	45.98	-1.39	7	3.1	22
1973	1	6	2	6	35.2	45.97	-1.55	11	3.7	16
1973	1	6	19	28	57.4	45.98	-1.43	6	3.1	20
1973	1	20	10	37	28.1	45.94	-1.47	2	4.8	15
1973	2	13	8	18	52.2	45.99	-1.35	6	3.0	25
1973	2	19	20	27	50.0	45.92	-1.47	6	3.3	13
1973	2	19	21	15	58.8	45.96	-1.36	8	3.0	22
1973	6	28	9	28	20.1	45.98	-1.35	6	3.2	24
1973	9	2	19	53	11.9	46.63	-0.08	3	3.0	144
1973	10	12	14	4	5.4	45.38	-3.27	20	3.2	142
1974	3	2	0	23	32.4	46.23	-1.79	7	3.3	48
1974	9	1	17	21	57.8	45.88	-1.43	9	3.4	12
1976	2	11	23	43	53.0	45.99	-1.46	10	3.4	20
1977	10	10	6	5	56.6	45.95	-1.44	12	3.5	17
1978	4	10	7	51	48.3	45.95	-1.45	4	3.3	17
1979	1	13	14	57	7.2	45.75	-1.23	9	3.3	27
1982	11	9	13	44	46.5	47.07	-1.76	25	3.3	139
1983	8	27	23	29	3.0	45.93	-1.43	2	3.1	16
1984	2	25	6	8	19.3	46.01	-1.84	1	3.2	30
1985	10	7	13	1	49.9	46.8	-0.42	1	3.3	139
1986	9	6	11	13	5.1	46.99	-1.72	0	3.0	130
1987	2	4	23	35	56.3	46.78	-1.82	8	3.0	108
1992	1	25	4	13	19.3	46.31	-1.29	8	3.1	58
1993	12	12	2	58	54.9	46.9	-1.17	0	3.2	123
1996	9	17	15	35	52.3	46.85	-1.98	10	3.0	118
1996	12	1	11	52	46.8	45.86	0.01	9	3.2	122
1997	1	12	1	24	2.0	46.55	-1.11	13	3.1	88
2001	4	5	17	26	58.7	46.23	0.1	0	3.3	136
2001	6	8	13	26	54.0	46.67	-1.05	13	3.7	102
2003	5	5	3	8	48.3	46.95	-1.04	0	3.1	131
2005	4	4	17	11	39.4	45.95	-1.41	20	3.1	18
2005	4	18	6	42	49.3	45.92	-1.39	2	3.4	17
2006	11	1	15	53	8.3	45.79	-1.09	20	3.0	37
2007	7	22	13	29	57.8	46.86	-1.34	20	3.3	116
2007	12	7	1	42	16.5	46.89	-0.69	20	3.2	136
2010	6	30	7	15	11.7	46.46	-0.76	10	3.5	94
2010	9	28	11	29	38.4	45.95	-1.41	8.7	3.8	18
2011	2	5	0	39	38.7	45.88	-1.42	7.4	3.3	13
2012	2	26	3	48	17.1	45.89	-1.38	10	3.3	16
2012	4	13	21	20	41.5	45.7	-1.88	12	3.1	28
2013	3	6	22	40	54.8	46.11	-1.69	5	3.3	33
2015	1	29	20	21	14.4	46.89	-0.74	2	3.0	134
2016	4	28	6	46	49.9	46.02	-1.29	7	4.3	30
2016	5	17	4	50	45.4	45.85	-0.59	10	3.3	75
2017	8	29	5	36	13.9	46.43	-3.17	2	3.1	140
2018	2	12	3	8	31	46.6	-0.63		3.9	112



Centre scientifique et technique
Direction des g eoressources (DGR)
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – T el. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr