



Document public

Exposition des côtes de la région Nord – Pas de Calais a un éventuel risque tsunami- Bilan des connaissances

Rapport final

BRGM/RP-56403-FR
mai 2008



Document public



Exposition des côtes de la région Nord – Pas de Calais a un eventuel risque tsunami- Bilan des connaissances

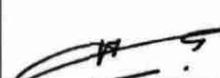
Rapport final

BRGM/RP -56403-FR
mai 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2007 07LITA06

J.R. Mossmann »
Avec la collaboration de
D. Moiriat

| |
|-----------------------|
| Vérificateur : |
| Nom : R. Pedreros |
| Date : |
| Signature : |

| |
|---|
| Approbateur : |
| Nom : Aguilhaume |
| Date 9/10/2008 |
| Michel Aguilhaume |
|  |

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Nord, Pas de Calais, littoral, côtes, tsunami, exposition

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Exposition des côtes de la région Nord – Pas de Calais a un éventuel risque tsunami- Bilan des connaissances. Rapport de Service Public BRGM RP-56403 FR, 48pages, 26 Illustrations

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La DIREN Nord – Pas de Calais – Bassin Artois – Picardie souhaite disposer d'une étude permettant d'apporter des éléments de jugement sur l'exposition des côtes de la région Nord – Pas de Calais à un éventuel risque tsunami, afin de pouvoir orienter les actions des pouvoirs publics.

L'étude bibliographique entreprise a montré que, pour que survienne un tsunami, plusieurs conditions devaient être réunies simultanément, telles que l'occurrence d'un séisme de forte magnitude en mer avec un mouvement vertical de la croûte terrestre, certains cas d'éruptions volcaniques ou le glissement à la mer (ou sous-marin) de grosses quantités de matériaux.

Si la sismicité de la région est faible, elle n'est pas nulle, et la question est de savoir si ce faible risque sismique est susceptible de provoquer un jour une vague déferlante justifiant la mise en place de mesures de prévention particulières, par rapport aux autres risques qui affectent le littoral, comme la montée du niveau marin ou l'ampleur des tempêtes saisonnières.

L'examen des données historiques disponibles montre qu'on n'a qu'une connaissance assez inégale de tous ces phénomènes, dont les occurrences, même si elles peuvent être spectaculaires, ne sont pas habituelles.

La sismicité locale, faible mais pas nulle, ne présente pas les caractéristiques requises pour générer un tsunami : les zones d'instabilité crustale, où des mouvements verticaux des plaques tectoniques peuvent être générés, ne se situent pas au large des côtes du Nord et du Pas de Calais.

Par ailleurs, le littoral régional, du fait de sa position géographique, semble être protégé de l'arrivée de trains d'ondes d'origine lointaine, car aucun enregistrement anormal n'est reporté dans la région lors des épisodes de tsunamis majeurs qui se sont produits dans le monde.

De même, la topographie du plancher marin sur la plate-forme continentale, et l'absence de déversements massifs de sédiments en pro-deltas potentiellement instables rendent peu plausible la possibilité de générer des glissements de masse sous-marins susceptibles de provoquer des tsunamis.

Ainsi, si le risque de survenance d'un tsunami sur les côtes régionales ne peut être considéré comme nul, il n'est pas quantifiable du fait que nous ne disposons pas de données l'ayant déjà décrit dans la région, et il ne peut pas représenter une préoccupation majeure au regard des autres risques auxquels la région se trouve habituellement confrontée.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 9 |
| 1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE | 9 |
| 1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE | 9 |
| 1.3. PRESENTATION DU RAPPORT | 9 |
| 2. Analyse du problème | 11 |
| 2.1. LE PHENOMENE TSUNAMI | 11 |
| 2.2. OCCURRENCE..... | 15 |
| 2.2.1. Au niveau mondial..... | 15 |
| 2.2.2. En France | 16 |
| 2.2.3. Situation régionale..... | 17 |
| 2.3. SYNTHESE DES DONNEES HISTORIQUES | 21 |
| 3. Analyse des facteurs à l'origine des tsunamis | 23 |
| 3.1. LES SEISMES..... | 23 |
| 3.1.1. Sismicité locale | 25 |
| 3.1.2. Facteurs favorisant..... | 27 |
| 3.2. LES GLISSEMENTS DE MASSE | 28 |
| 3.2.1. En Région Nord Pas de Calais | 29 |
| 3.2.2. Facteurs favorisant..... | 30 |
| 3.3. LES CHUTES DE BLOCS | 31 |
| 3.4. LES CHUTES DE METEORITES | 31 |
| 3.5. LES ERUPTIONS VOLCANIQUES | 32 |
| 4. Modélisation | 33 |
| 5. Conclusion | 41 |
| 6. Bibliographie | 45 |

Liste des illustrations

| | |
|---|----|
| Illustration 1 : Schéma de propagation d'un tsunami depuis le milieu profond jusqu'à la côte (source : http://www.prh.noaa.gov/itic/fr/library/pubs/great_waves/tsunami_great_waves.html)..... | 12 |
| Illustration 2: Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (Pedreros et Poisson, 2007)..... | 12 |
| Illustration 3 : Vitesses orbitales des vagues de tempête (a) et des tsunamis (b) (source : http://www4.ncsu.edu/eos/users/c/ceknowle/public/chapter10/part1.html)..... | 14 |
| Illustration 4: Caractéristiques de vagues de tempête (en haut) et d'un tsunami. | 14 |
| Illustration 5 : Répartition des événements de type tsunami. 2a Principaux pays concernés au niveau mondial (nombre d'événements recensés et pourcentage du total). 2b Principaux pays européens concernés (nombre d'événements recensés et pourcentage en Europe). L'Italie et la Grèce totalisent à eux seuls les trois quarts des événements de type tsunami recensés en Europe. (d'après NOAA National Geophysical Data Center, 2008) | 15 |
| Illustration 6 : Référencement des événements de type tsunami en France (Source : NOAA National Geophysical Data Center, 2008)..... | 17 |
| Illustration 7 : Inventaire des événements de type tsunami ayant affecté la Grande Bretagne (Source : NOAA National Geophysical Data Center, 2008) | 18 |
| Illustration 8 : Vue 3D du cratère de Silverpit, au large des côtes de Grande Bretagne (New Scientist, 2002)..... | 19 |
| Illustration 9 : Inventaire des événements de type tsunami aux Pays Bas. (Source : NOAA National Geophysical Data Center, 2008)..... | 20 |
| Illustration 10 : Zone de glissement de Storegga (Mer de Norvège) et hauteurs estimées des vagues générées par le tsunami consécutif au glissement de terrain sous marin, il y a 7900 ans environ (dans Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique, http://www.sciencesnaturelles.be/institute , d'après Bondevik et al, 1997)..... | 20 |
| Illustration 11 : Synthèse des événements tsunamiques dans le monde ayant entraîné des dégâts (en rouge) et n'ayant pas entraîné de dégâts (en blanc). (Source : West Coast and Alaska Tsunami warning Center)..... | 21 |
| Illustration 12 : Estimation par l'USGS du nombre annuel moyen de séismes dans le monde..... | 24 |
| Illustration 13 : Schéma de principe de la formation d'un tsunami suite à un séisme sous marin (In Tsunami : Origine, Physique et Observations Philippe Lognonné Institut de Physique du Globe de Paris, Séminaire ENS Lyon, 08/06/2007) | 24 |
| Illustration 14 : Carte d'aléa sismique du monde (a) et de l'Europe (b). L'aléa est indiqué par les couleurs, du blanc (zones continentales stables?) au rouge foncé (zones fortement sismiques) (Giardini et al, 1999)..... | 26 |
| Illustration 15 : Inventaire sismique de la région du Nord de la France | 27 |
| Illustration 16 : Trajet sous marin du glissement de Nice du 16 octobre 1979 (B. Savoye et al, 2006)..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Illustration 17 Bathymétrie de la Manche et de la Mer du Nord (Source : SHOM 2003)..... | 29 |
| Illustration 18 : Paléo-vallées du détroit du Pas de Calais. En gris, vallées comblées par des sédiments, en hachuré et en blanc, vallées dépourvues de sédiments (dans Gupta et al, 2007) | 30 |
| Illustration 19 : Schéma conceptuel du modèle simplifié pour figurer la surcote (a) et la submersion (b) (Cannata et al, 2007) | 35 |
| Illustration 20 : Exemple de restitution cartographique de la submersion. a) zoom sur la région de Bergeggi sur la côte ligure, constituée de plages planes (entouré bleu en bas) et de falaises rocheuses (entouré bleu en haut). Les parties submergées sont cartographiées en rouge et en jaune, correspondant à la superposition de différentes conditions à l'épicentre (Federici et al, 2006) ; b) Ile de Sainte Lucie. Les zones inondées sont cartographiées en bleu. Ho est la hauteur de la vague au départ de l'épicentre situé aux Îles Vierges de 1867 (Cannata et al, 2007) | 35 |
| Illustration 21 : Synthèse des différents scénarios testés pour chacun des trois événements. Ho : hauteur initial de la vague au niveau de l'épicentre ; H : hauteur du shoaling ; Run-up max : Hauteur maximale du run-up (extrait de Cannata et al, 2007) | 36 |
| Illustration 22 : Copie d'écran d'une feuille de calcul appliquant l'approche simplifiée de Cannata et al, 2007 | 37 |
| Illustration 23 : Carte de propagation d'un tsunami localisé au large de côtes portugaises. Noter que, contrairement à l'approche simplifiée qui aurait calculé une submersion, alors que la région n'est pas concernée par la vague (d'après http://tsunami.jrc.it/model/model.asp , JRC/IPSC/SES) | 38 |
| Illustration 24 : Propagation d'un tsunami potentiel à partir d'un séisme majeur au large des Etats-Unis (d'après http://tsunami.jrc.it/model/model.asp , JRC/IPSC/SES)..... | 39 |
| Illustration 25 : Propagation d'un tsunami potentiel à partir d'un séisme majeur au large dans le détroit du Pas de Calais. | 39 |
| Illustration 26 : Résultat du calcul de la hauteur maximale théorique de crête (m) et de profondeur d'inondation (m) pour différentes configurations topographiques théoriques et pour différentes hauteurs théoriques de vague initiale, en utilisant une approche simplifiée de Cannata et al. 2007 . Les valeurs sur fond vert correspondent aux scénarios les moins irréalistes. Le calcul suppose une conservation totale de l'énergie des vagues lorsqu'elles atteignent la côte. La pente émergée est considérée ici identique à la pente immergée..... | 40 |

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les tsunamis sont des phénomènes naturels potentiellement dévastateurs. Il s'en produit régulièrement de par le monde. Avec l'accroissement de la population et surtout de l'urbanisation en zone côtière, les effets de ces vagues, quand elles atteignent la côte, peuvent être catastrophiques. Le tsunami qui a ravagé les côtes du sud-est asiatique en décembre 2004 (Indonésie, Thaïlande, Sri Lanka, ...) a amené les pouvoirs publics en France à s'interroger sur la possibilité qu'un tel événement se produise sur nos côtes, et s'il y avait lieu de prévoir des mesures particulières de gestion de l'espace côtier au regard d'un éventuel risque de tsunami.

1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE

La DIREN Nord – Pas de Calais – Bassin Artois – Picardie souhaite ainsi disposer d'une étude permettant d'apporter des éléments de jugement sur l'exposition des côtes de la région Nord – Pas de Calais à ce type de phénomène, afin de pouvoir orienter les actions des pouvoirs publics, en particulier dans le cadre du plan national sur la sismicité actuellement mis en place.

L'apparition d'une vague susceptible d'envahir le littoral peut être le résultat d'une activité sismique au large initialisant une onde de grande énergie, ou celui d'un effondrement massif de terrain au niveau du talus continental.

Si la sismicité de la région est faible, elle n'est pas nulle, et la question est de savoir si ce faible risque sismique est susceptible de provoquer un jour des vagues justifiant la mise en place de mesures de prévention particulières, par rapport aux autres risques qui peuvent exposer le littoral, comme la montée du niveau marin, l'ampleur des tempêtes saisonnières ou le drainage des waterings.

1.3. PRESENTATION DU RAPPORT

Pour répondre à cette demande de la DIREN, le Service Géologique Nord Pas de Calais propose de recueillir et d'analyser les informations documentaires disponibles sur l'historique des événements sismiques et de type tsunami connus, ainsi que d'analyser la pertinence des facteurs susceptibles de favoriser la survenance d'un tsunami dans la région. Pour cela, les facteurs permettant la génération d'un tsunami

et ceux qui en favorisent le développement seront présentés et discutés, au regard des conditions géologiques et géographiques de l'Europe nord occidentale.

2. Analyse du problème

2.1. LE PHENOMENE TSUNAMI

Un tsunami (*du japonais tsu : port et nami : vague*) correspond à une série de vagues provoquée par une action mécanique brutale et de grande ampleur au niveau d'un lac, d'une mer ou d'un océan. Ces actions sont le plus souvent d'origine tectonique, volcanique ou liées à des glissements de terrain mais un impact météoritique peut aussi en être la cause.

En fonction de la distance parcourue depuis leur génération on distingue les tsunamis de **champ proche** (< 100 -200 km) et de **champ lointain** (plusieurs centaines à milliers de kilomètres) ainsi que les **teletsunamis** (ils traversent tout un océan). Les séismes peuvent constituer des sources tsunamigéniques proches ou lointaines, tandis que les mouvements de terrain sont généralement considérés comme des champs proches.

Les tsunamis peuvent être décrits selon 3 phases : la génération, la propagation et l'inondation.

A la phase de **génération**, les tsunamis se caractérisent par des périodes (**T**, durée entre deux vagues consécutives) allant de quelques minutes (généralement liés à des glissements terrain) à plus d'une heure lorsqu'ils sont causés par des événements tectoniques majeurs. Les longueurs d'onde associées (**L**, distance entre deux vagues consécutives) peuvent alors varier de plusieurs dizaines à quelques centaines de km. Bien souvent, L est largement supérieure à la profondeur (**P**). Dans ce cas, les tsunamis obéissent à la théorie des « ondes longues » qui prévoit une vitesse de **propagation (V) homogène sur toute la tranche d'eau**. V peut être alors approchée par la relation :

$$V = \sqrt{g \times P} \quad \text{où } g \text{ correspond à l'accélération terrestre } (9.81\text{ms}^{-2}).$$

Ainsi en se **propageant** vers la côte, l'onde rencontre des profondeurs de plus en plus faibles en faisant chuter sa vitesse : par exemple, de 943 km/h à 7000 m de profondeur à 36 km/h à 10 m de profondeur (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cela implique également une diminution de L ($L = V \times T$). Comme la quasi-totalité de l'énergie transportée par le tsunami est conservée lors de sa propagation, cela implique une forte augmentation des hauteurs des vagues en eau peu profonde (*étape de gonflement*).

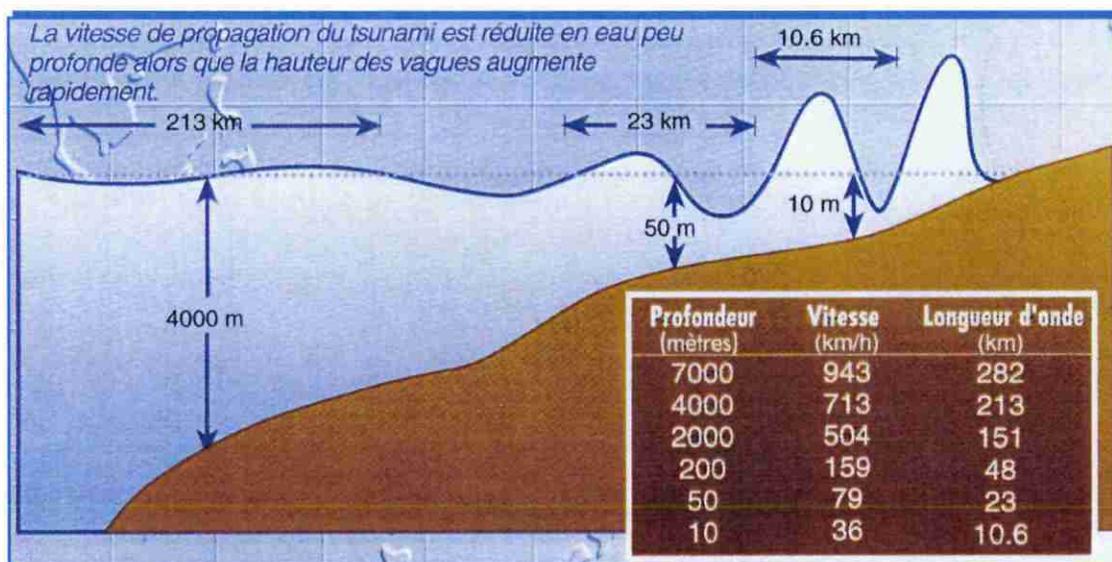


Illustration 1 : Schéma de propagation d'un tsunami depuis le milieu profond jusqu'à la côte (source : http://www.prh.noaa.gov/itic/fr/library/pubs/great_waves/tsunami_great_waves.html).

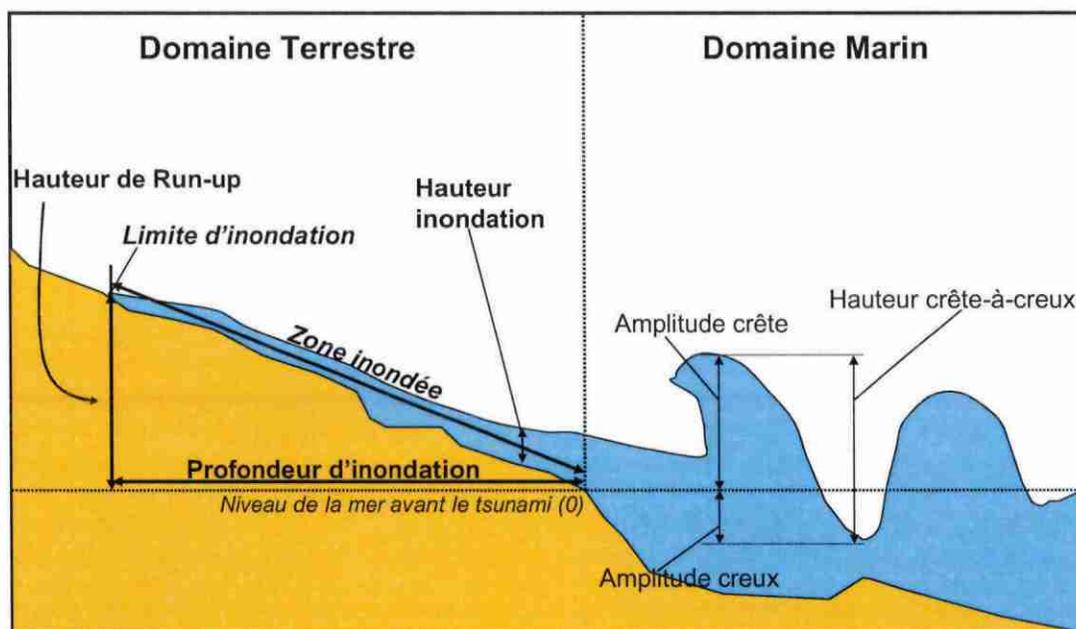


Illustration 2 : Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (Pedreros et Poisson, 2007).

Il existe un seuil, défini par le rapport entre la hauteur des vagues et la profondeur de l'eau, au-delà duquel les vagues peuvent déferler.

A noter que la hauteur des vagues correspond à la somme de l'amplitude de la crête et l'amplitude du creux (hauteur crête-à-creux, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

L'inondation du domaine terrestre dépendra des caractéristiques du tsunami près du rivage (amplitude, période et longueur d'onde des vagues) et de la topographie côtière. En cas d'inondation, le tsunami ne se comporte plus comme une onde mais comme un torrent qui sera plus ou moins chenalisé par la topographie et d'éventuelles rivières ou canaux. Il interagira également avec la végétation, les ouvrages et le bâti côtiers. La limite d'inondation, correspondant à l'enveloppe de l'excursion maximale de l'eau dans le domaine terrestre, permet de caractériser cette zone inondée. On parle de **hauteur du run-up** et de **profondeur d'inondation** comme étant respectivement l'altitude et la distance horizontale de la limite d'inondation par rapport au niveau de la mer avant le tsunami. Localement, on peut également s'intéresser à **la hauteur** (ou épaisseur) **d'inondation** qui équivaut à la différence entre les altitudes du plan d'eau et celle du substrat.

Différences entre les tsunamis et les vagues de tempête

A la différence des tsunamis, les vagues de tempêtes sont générées par le vent. De ce fait, elles ont des caractéristiques très différentes de celles des tsunamis. Ainsi ces vagues dépassent rarement 20 s de période, 400 m de longueur d'onde et 90 km/h de vitesse de propagation. En haute mer, leur influence ne se fait sentir qu'à proximité de la surface de l'eau et non pas sur toute la colonne d'eau comme pour les tsunamis (Illustration 3). A proximité du rivage, les vagues de tempête et les tsunamis peuvent avoir la même hauteur. Néanmoins, leurs impact en termes d'inondation est complètement différent. Les tsunamis, de part leurs longueurs d'onde et périodes plus importantes, transportent vers la côte de plus grands volumes d'eau et cela sur une durée plus longue. L'étendue des zones inondées est alors plus importante que pour les vagues de tempête (Illustration 4).

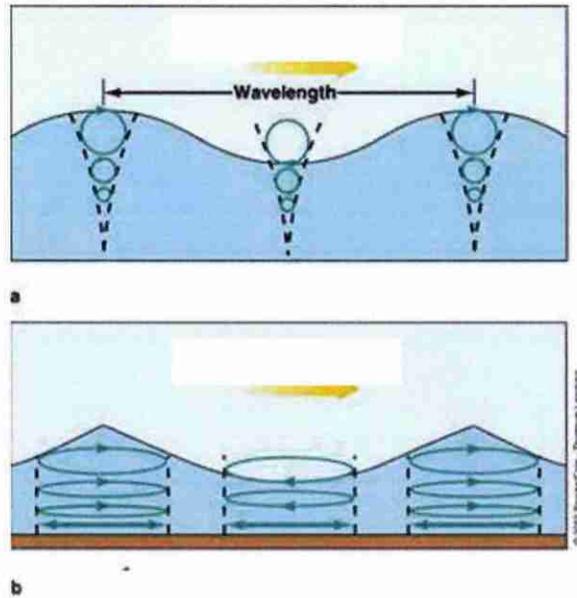
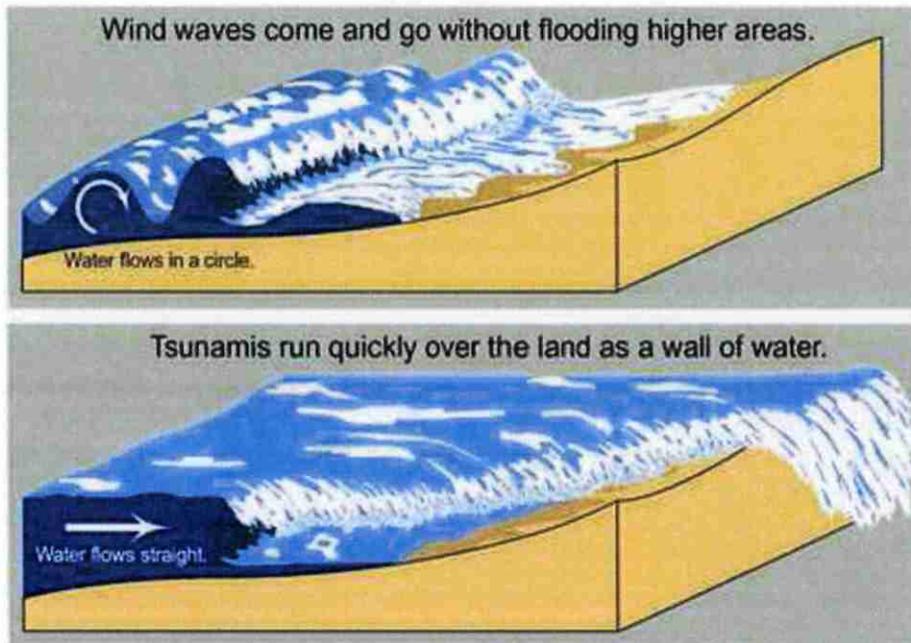


Illustration 3 : Vitesses orbitales des vagues de tempête (a) et des tsunamis (b) (source : <http://www4.ncsu.edu/eos/users/c/ceknowle/public/chapter10/part1.html>)



Source : University of Washington, Earth and Space Science (<http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html>)

Illustration 4: Caractéristiques de vagues de tempête (en haut) et d'un tsunami.

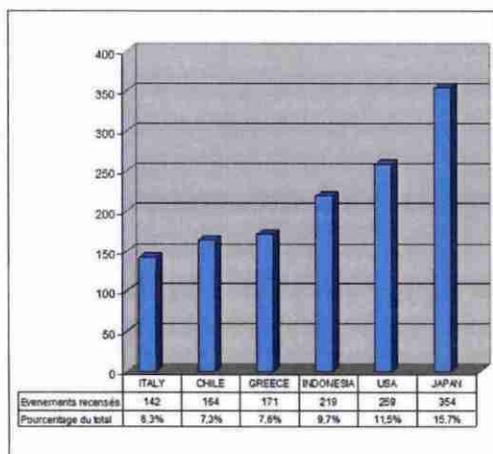
2.2. OCCURRENCE

2.2.1. Au niveau mondial

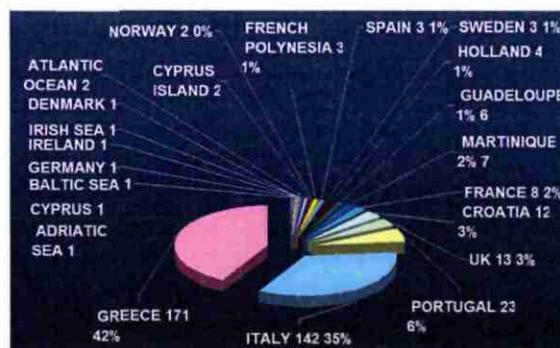
On recense, au niveau mondial, environ 2200 phénomènes connus de type tsunami (NOAA, National Geophysical Data Center, NGDC).

La base de données du Centre national des données géophysiques de l'Administration nationale pour l'océan et l'atmosphère (NOAA, <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>) dénombre en effet, pour les quarante derniers siècles, au niveau mondial, 2261 événements répertoriés comme étant de nature tsunami, mais dont seulement 806 sont réellement validés comme tels, 363 autres étant considérés comme probablement des tsunamis. Les autres événements référencés dans cette base de données (soit près de la moitié) sont évalués comme douteux ou très douteux.

A côté de ces chiffres, on constate également que les événements de type tsunami sont inégalement répartis sur 101 pays, puisque 6 pays présentent chacun plus de 100 occurrences, représentant à eux seuls près de 60 % de l'ensemble (Illustration 5a). En Europe, ce sont essentiellement l'Italie et la Grèce qui sont les plus concernées (Illustration 5b)



a)



b)

Illustration 5 : Répartition des événements de type tsunami. 2a Principaux pays concernés au niveau mondial (nombre d'événements recensés et pourcentage du total). 2b Principaux pays européens concernés (nombre d'événements recensés et pourcentage en Europe). L'Italie et la Grèce totalisent à eux seuls les trois quarts des événements de type tsunami recensés en Europe. (d'après NOAA National Geophysical Data Center, 2008)

2.2.2. En France

Selon le National Geophysical Data Center, la France (territoire métropolitain) recenserait 8 événements, auxquels il convient d'ajouter 7 en Martinique, 6 en Guadeloupe et 3 en Polynésie française (Illustration 6). Ces valeurs, fournies par le NGDC ne sont pas tout à fait cohérentes avec l'inventaire réalisé en 2006 par le BRGM (Lambert, 2006), et remis à jour en 2008 (www.tsunamis.fr), qui recense deux événements tsunamiques dans le Pas de Calais, en 1811 et en 1858.

| Année | Evaluation | Facteur déclenchant | Pays | Territoire | Latitude | Longitude | Hauteur de vague (m) | Nombre de vague | Intensité |
|-------|--------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------------------|----------|-----------|----------------------|-----------------|-----------|
| 1979 | Certain | Glissement de terrain | FRANCE | FRENCH RIVIERA (LIGURIAN SEA) | 43.700 | 7.250 | 10.00 | 2 | |
| 1999 | Certain | Glissement de terrain | FRENCH POLYNESIA | FATU HIVA | | | 5.00 | 1 | |
| 1823 | Certain | Séisme | MARTINIQUE | SAINT PIERRE | 14.400 | -61.000 | | 1 | |
| 1843 | Certain | Séisme | GUADELOUPE | POINTE-A-PITRE | 16.500 | -62.200 | 1.20 | 1 | |
| 1969 | Certain | Séisme | GUADELOUPE | GRAND BOURG | 15.800 | -59.700 | .46 | 3 | |
| 1985 | Certain | Séisme | GUADELOUPE | GUADELOUPE | 17.013 | -62.448 | .12 | 1 | |
| 2004 | Certain | Séisme | GUADELOUPE | BASSE-TERRE, LES SAINTES | 15.679 | -61.706 | .70 | 7 | |
| 1902 | Certain | Volcanisme | MARTINIQUE | MOUNT PELEE | 14.820 | -61.170 | 1.00 | 1 | |
| 1902 | Certain | Volcanisme et glissement de terrain | MARTINIQUE | MONT PELEE | 14.820 | -61.170 | 5.00 | 1 | |
| 1885 | Probable | Inconnu | FRANCE | LIGURIAN SEA | | | | 0 | 4 |
| 1564 | Probable | Séisme | FRANCE | VALLEY OF THE RIVER LA VESUBIE | 44.000 | 7.300 | | 1 | 4 |
| 1767 | Probable | Séisme | MARTINIQUE | MARTINIQUE & BARBADOS | 14.400 | -61.000 | | 2 | |
| 1808 | Probable | Séisme | FRANCE | MARSEILLE | 44.800 | 7.300 | | 1 | 2 |
| 1855 | Douteux | Inconnu | FRANCE | LIGURIAN SEA - NICE | | | | 1 | 3 |
| 1824 | Douteux | Séisme | MARTINIQUE | ST. PIERRE | 14.400 | -61.000 | | 1 | |
| 1848 | Douteux | Séisme | FRENCH POLYNESIA | TAHITI | -17.900 | -149.900 | | 2 | |
| 1854 | Douteux | Séisme | FRANCE | LIGURIAN SEA | 43.750 | 7.830 | | 1 | |
| 1862 | Douteux | Séisme | FRANCE | LIGURIAN SEA | | | | 0 | |
| 1902 | Douteux | Volcanisme | MARTINIQUE | MONT PELEE | 14.820 | -61.170 | | 1 | |
| 1902 | Douteux | Volcanisme | MARTINIQUE | MONT PELEE | 14.820 | -61.170 | | 4 | |
| 1775 | Très douteux | Séisme | FRANCE | ISLAND OF CORSICA | | | | 1 | |
| 1844 | Très douteux | Séisme | FRENCH POLYNESIA | MARQUESAS ISLANDS/SOCIETY ISLANDS | | | | 0 | |
| 1843 | Très douteux | Volcanisme | GUADELOUPE | MARIE-GALANTE ISLAND | 15.933 | -61.267 | | 1 | |

| Année | Evaluation | Facteur déclenchant | Pays | Territoire | Latitude | Longitude | Hauteur de vague (m) | Nombre de vague | Intensité |
|-------|----------------|---------------------|------------|-------------|----------|-----------|----------------------|-----------------|-----------|
| 1824 | Donnée erronée | Météorologique | GUADELOUPE | BASSE TERRE | 16.700 | -62.200 | | 1 | |

Illustration 6 :: Référencement des événements de type tsunami en France (Source : NOAA National Geophysical Data Center, 2008)

A noter cependant que seuls 13 événements correspondent à des tsunamis probables ou certains, les autres étant douteux. Les séismes représentent l'élément déclencheur identifié dans 14 cas (8 tsunamis probables ou certains, 6 douteux).

Si le phénomène de type tsunami n'est pas tout à fait inconnu en France, son occurrence est cependant très faible comparativement à d'autres pays, et, surtout, à d'autres risques comme les tempêtes dont la récurrence est bien plus importante.

2.2.3. Situation régionale

a) Nord Pas de Calais

La base de données recense deux phénomènes de type tsunami en région Nord Pas de Calais, au dix neuvième siècle, qui, selon les récits de l'époque ont provoqué quelques dommages aux navires amarrés dans les ports de Boulogne et Calais. Par ailleurs, certains écrits concernant le tremblement de terre de 1580 font état de vagues et de submersions, ayant entraîné des dégâts et des victimes (rapporté dans Lambert, 1997). Cependant, les écrits de l'époque sont peu précis, et n'apportent pas d'éléments suffisants pour classer cet événement parmi les tsunamis, même s'il est permis de penser que ce séisme a pu s'accompagner de mouvements de vagues anormaux. Cet événement figure dans la base de données du NGDC, répertorié en Grande Bretagne (Illustration 7), et évalué comme douteux en tant que tsunami.

b) Grande Bretagne

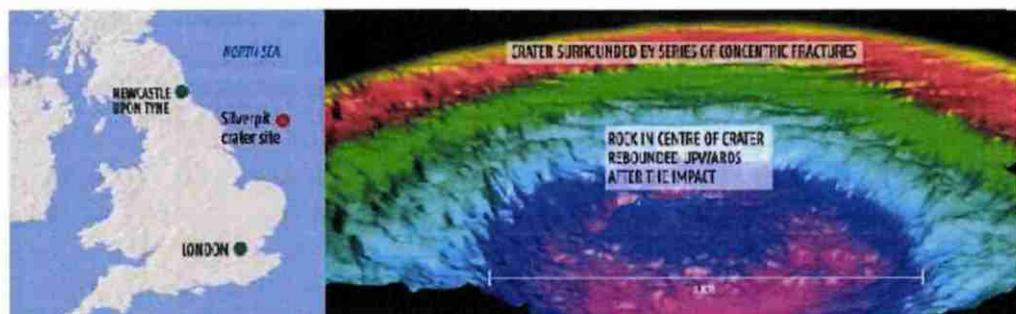
Autour de la région Nord Pas de Calais, la base de données recense 13 événements ayant affecté la Grande Bretagne au cours de l'histoire (Illustration 7). Seul celui de 1755 est un événement certain, relié au séisme de Lisbonne qui a été à l'origine d'un tsunami sur les côtes portugaises, et ressenti jusqu'en Grande Bretagne. Les autres événements recensés sont très douteux, y compris celui de 1580 également documenté dans le Pas de Calais, mais pour lequel on a du mal à faire la part de la conséquence de la secousse dans les destructions rapportées, jusqu'au-delà de Lille à l'intérieur des terres, de celle d'un éventuel tsunami. Il semble cependant incontestable que ce séisme a pu provoquer une agitation anormale de la mer au niveau de la côte, sans que nous disposions d'éléments suffisants pour ranger cet épisode dans la

catégorie des tsunamis. Les conditions bathymétriques locales sont suffisantes pour expliquer l'absence de phénomène de type tsunami.

| Année | Evaluation | Facteur déclenchant | Territoire | Latitude | Longitude | Hauteur de vague (m) | Nombre de vagues |
|-------|--------------|---------------------|-------------------|----------|-----------|----------------------|------------------|
| 1755 | Certain | Inconnu | ENGLAND | | | .90 | 1 |
| 1099 | Très douteux | Inconnu | SOUTHWEST ENGLAND | 50.100 | -5.500 | | 1 |
| 1580 | Très douteux | Séisme | ENGLISH CHANNEL | | | | 2 |
| 1609 | Très douteux | Inconnu | ENGLAND | | | | 0 |
| 1756 | Très douteux | Inconnu | ENGLAND | 51.200 | | 1.80 | 1 |
| 1757 | Très douteux | Séisme | ENGLAND | 49.600 | | | 0 |
| 1761 | Très douteux | Inconnu | ENGLAND | | | | 0 |
| 1761 | Très douteux | Séisme | ENGLISH CHANNEL | 49.300 | | | 0 |
| 1762 | Très douteux | Inconnu | ENGLAND | 51.500 | .100 | 3.00 | 1 |
| 1763 | Très douteux | Inconnu | WEYMOUTH, ENGLAND | 50.600 | -2.450 | 3.00 | 1 |
| 1767 | Très douteux | Inconnu | ENGLAND | | | | 0 |
| 1798 | Très douteux | Inconnu | ENGLAND | | | | 0 |
| 1926 | Très douteux | Inconnu | ENGLISH CHANNEL | | | | 0 |

Illustration 7 : Inventaire des événements de type tsunami ayant affecté la Grande Bretagne (Source : NOAA National Geophysical Data Center, 2008)

Plus récemment en 2002, la revue Nature (Volume 418, page 520) a rapporté la découverte d'un géophysicien travaillant pour le compte de la British Petroleum au large des côtes de Grande Bretagne en Mer du Nord (Stewart et Allen, 2002) : une structure concentrique d'une vingtaine de kilomètres de diamètre, qui affecte les niveaux de craie sus-jacents à un champ de gaz au niveau de Silverpit (« Cratère de Silverpit », Illustration 8). Ces structures correspondraient selon leur découvreur, à un impact de météorite qui aurait pu engendrer un tsunami géant.



Source New Scientist 2002, <http://www.newscientist.com/article/dn2622-unique-meteorite-crater-found-under-north-sea.html> -

Illustration 8 : Vue 3D du cratère de Silverpit, au large des côtes de Grande Bretagne (New Scientist, 2002)

Cependant, d'autres spécialistes mettent en doute cette interprétation devant le manque d'évidence de figures d'impact accompagnant ces structures, et en arguant que ce type de structure se rencontre bien plus fréquemment en conséquence de phénomènes d'halokinèse dans les bassins sédimentaires (Underhill, 2004). Or le bassin de la Mer du Nord contient des niveaux salins dont les déformations en fluage peuvent expliquer ce type de figure, dont plusieurs autres seraient documentées dans le secteur.

c) Pays Bas

Les Pays Bas semblent également avoir enregistré des événements de type tsunami, mais ceux-ci sont également très peu documentés (Illustration 9). Aucun de ces événements n'apparaît d'ailleurs sur les côtes britanniques ou sur les côtes françaises, et aucun ne semble avoir eu un impact comparable à celui qu'aurait eu un tsunami.

| Année | Evaluation | Facteur déclenchant | Territoire | Latitude | Longitude | Hauteur de la vague* (m) | Nombre de vagues | Intensité |
|-------|--------------|---------------------|------------|----------|-----------|--------------------------|------------------|-----------|
| 1571 | Très douteux | Inconnu | HOLLAND | | | 4,0 | 1 | 2,5 |
| 1640 | Très douteux | Séisme | HOLLAND | | | 1,4 | 0 | 1 |
| 1792 | Très douteux | Inconnu | HOLLAND | 52.370 | 4.530 | 1,4 | 0 | 1 |
| 1830 | Très douteux | Inconnu | HOLLAND | | | 22,6 | 0 | 5 |

* La hauteur maximale de la vague est ici estimée à partir de l'intensité déclarée du tsunami, celle-ci étant définie dans la base de données comme étant égale à $\log_2(h\sqrt{2})$, où h est la hauteur maximale de la vague. Il ne s'agit pas d'une donnée de la base de données

Illustration 9 : Inventaire des événements de type tsunami aux Pays Bas. (Source : NOAA National Geophysical Data Center, 2008)

d) Norvège

En Norvège, seul un épisode datant de plusieurs milliers d'années est rapporté comme pouvant avoir été un paléotsunami.

En effet, les inventaires disponibles ne recensent que les événements connus historiquement, au travers d'écrits ou de témoignages, plus ou moins précis ou complets au demeurant, mais seuls deux événements historiques (1762 et 1819) sont recensés en Norvège. A remarquer qu'il ne s'agit pas du même événement que celui qui est recensé en 1762 en Angleterre : celui de Norvège est daté du 26 mai de cette année là, et celui d'Angleterre est daté du 27 septembre.

Mais le phénomène a certainement existé avant les temps historiques, et il semblerait qu'on peut en rechercher dans des temps beaucoup plus reculés. Pour ce qui concerne l'histoire géologique très récente (< 10000 ans), Bondevik et al (1997) mentionnent ainsi l'existence d'une couche de sable de quelques centimètres d'épaisseur incluse dans les sédiments déposés il y a environ 8000 ans. Cette couche se retrouve sur le littoral de la côte est de l'Ecosse jusqu'au nord de l'Angleterre. Elle est attribuée à un dépôt consécutif à un tsunami qui se serait déclenché au large de la Norvège, il y a environ 7900 ans, le long de la pente de la mer de Norvège (zone de glissement de Storegga), et qui aurait affecté l'Ecosse, les côtes d'Islande, de Norvège, des Iles Féroé et du Shetland (Illustration 10)

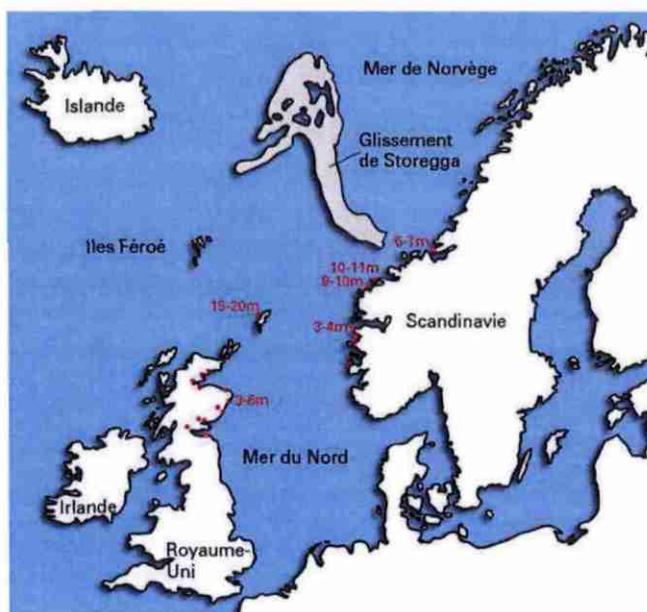
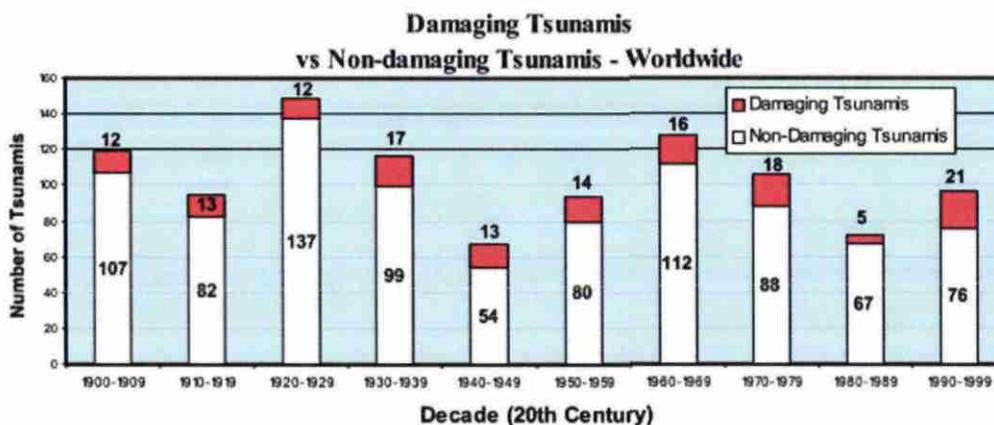


Illustration 10 : Zone de glissement de Storegga (Mer de Norvège) et hauteurs estimées des vagues générées par le tsunami consécutif au glissement de terrain sous marin, il y a 7900 ans

environ (dans Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique, <http://www.sciencesnaturelles.be/institute>, d'après Bondevik et al, 1997)

2.3. SYNTHÈSE DES DONNÉES HISTORIQUES

Statistiquement, les recensements à l'échelle mondiale des événements de type tsunami connus ou supposés montrent une occurrence d'environ un tous les deux ans (2261 événements recensés en 4000 ans environ). Si ces chiffres n'ont pas de grande signification en eux même, d'autant que la disponibilité des données est très variable selon les époques et les pays considérés : la moitié environ des 2200 événements recensés sur 40 siècles l'ont été durant le siècle dernier, ils montrent cependant que l'événement tsunami n'est pas très fréquent, et en tout cas beaucoup moins fréquent que d'autres catastrophes naturelles. En affinant l'analyse de la base de données du NGDC sur le 20^e siècle où l'on commence à avoir un recensement un peu plus précis (près de la moitié des événements recensés dans la base sur 40 siècles concernent le 20^e siècle), on constate que moins de 15 % des tsunamis recensés ont causé des dégâts (soit plus de 85 % des cas où il n'y a pas eu de destructions, Illustration 11)



D'après NOAA, <http://wcatwc.arh.noaa.gov/tsustats.pdf>.

Illustration 11 : Synthèse des événements tsunamiques dans le monde ayant entraîné des dégâts (en rouge) et n'ayant pas entraîné de dégâts (en blanc). (Source : West Coast and Alaska Tsunami warning Center)

A l'échelle du territoire national, quelques événements se sont produits au cours des quarante derniers siècles, mais aucun n'a concerné le littoral régional, à l'exclusion possible de l'événement de 1580, mais pour lequel on pense que l'essentiel des dégâts reportés sont plutôt une conséquence de la secousse que d'un phénomène de type tsunami, et de deux événements datés du 8 juin 1858 et du 19 septembre 1810.

Ce dernier est d'ailleurs connu au travers des articles de presse parus au lendemain du 8 juin 1858, qui le mentionnent comme un précédent dans la région. L'épisode du 8 juin 1858, pour lequel les relations de l'époque le mentionnent au Havre, Boulogne, Calais et sur la côte sud de la Grande Bretagne, ne semble pas avoir été documenté hors du Pas de Calais. La base de données du NGDC ne recense pas non plus, ailleurs dans le monde, de tsunamis pendant cette période (les 5 tsunamis recensés concernent les mois de février, avril, septembre deux fois et décembre, mais pas le mois de juin). S'il s'est manifestement passé quelque chose à l'époque, on ne dispose pas d'informations très précises permettant de la décrire.

L'examen des événements ayant pu concerner les régions limitrophes montre un constat similaire. Le seul événement historique suffisamment documenté concerne l'année 1755 où un tsunami a été recensé sur les côtes anglaises. Il s'agit du même événement que celui qui a affecté le Portugal, donc une origine extra régionale de l'événement initiateur. A noter que rien n'a été enregistré en 1755 sur les côtes de la région du Nord et du Pas de Calais, ce qui semble indiquer que l'événement est arrivé suffisamment atténué pour passer inaperçu au niveau du littoral régional.

En effet, pour que les côtes soient affectées par un phénomène de type tsunami, il ne suffit pas seulement d'un événement déclenchant, mais il faut également réunir un certain nombre de facteurs favorisant la génération d'un tsunami. Ceci peut expliquer pourquoi cette partie du continent européen semble plus épargnée que d'autres par les phénomènes de type tsunami.

La suite du rapport va s'attacher à analyser, d'une part, les facteurs déclenchant nécessaires à la génération d'un tsunami, et, d'autre part, les facteurs favorisant, en examinant localement la pertinence des ces facteurs.

3. Analyse des facteurs à l'origine des tsunamis

Il faut réunir un certain nombre de conditions pour générer un tsunami, la première d'entre elles étant un phénomène déclenchant capable de transmettre une énergie capable de mobiliser une colonne d'eau suffisamment importante, et cela dans un environnement favorisant la formation d'une onde de gravité. On distingue ainsi deux types de facteurs : les facteurs déclenchant et les facteurs favorisant. C'est la combinaison de ces deux facteurs qui peut permettre l'apparition d'un tsunami.

Les facteurs déclenchant sont les facteurs qui initient le phénomène, en fournissant l'énergie nécessaire à la mise en mouvement de grandes quantités d'eau.

Les facteurs déclenchant identifiés sont :

1. Les séismes ;
2. Les glissements de masse sous marins ;
3. Les chutes de blocs ;
4. Les chutes de météorites ;
5. Les éruptions volcaniques.

A noter que plusieurs facteurs déclenchant peuvent être à l'origine d'un tsunami, effet cascade : séisme et éruption volcanique, séisme et glissements de masse, éruptions volcaniques et glissements de masse, etc.

3.1. LES SEISMES

Les séismes sont probablement les facteurs déclenchant le plus communément invoqués susceptibles d'initier un tsunami. Il s'agit effectivement d'un phénomène géologique naturel potentiellement suffisant pour fournir la quantité d'énergie nécessaire à la formation d'un tsunami. Dans la réalité, seule une très faible proportion de séismes est susceptible de générer un tsunami, et une proportion encore bien plus faible de générer un tsunami dévastateur.

C'est ainsi que l'on recense, au travers du monde, plusieurs millions de tremblements de terre par an, selon l'US Geological Survey (<http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.html>, Illustration 12)

Frequency of Occurrence of Earthquakes

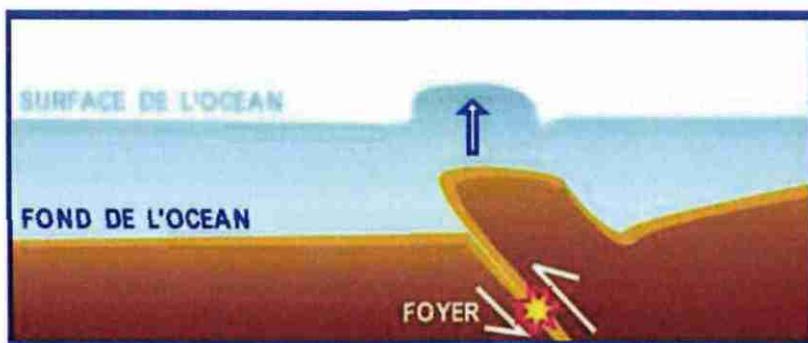
| Magnitude | Average Annually |
|--------------|--------------------------|
| 8 and higher | 1 ¹ |
| 7 - 7.9 | 17 ² |
| 6 - 6.9 | 134 ² |
| 5 - 5.9 | 1319 ² |
| 4 - 4.9 | 13,000 (estimated) |
| 3 - 3.9 | 130,000 (estimated) |
| 2 - 2.9 | 1,300,000 (estimated) |

¹ Based on observations since 1900.
² Based on observations since 1990.

Source : US Geological Survey (<http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.html>)

Illustration 12 : Estimation par l'USGS du nombre annuel moyen de séismes dans le monde

On considère généralement, bien que cela ne soit pas une règle absolue, que seuls les séismes les plus forts seraient capables de donner naissance à un tsunami (Annuziati et Best, 2005). En effet, c'est essentiellement le déplacement vertical d'un compartiment lors d'un séisme qui peut mettre en mouvement la colonne d'eau sus-jacente. Il faut donc être en présence d'un séisme sous marin de forte intensité, permettant un décalage vertical suffisant du fond océanique (Illustration 13). Les séismes s'accompagnant d'un décalage horizontal de la croûte ne génèrent pas de tsunamis



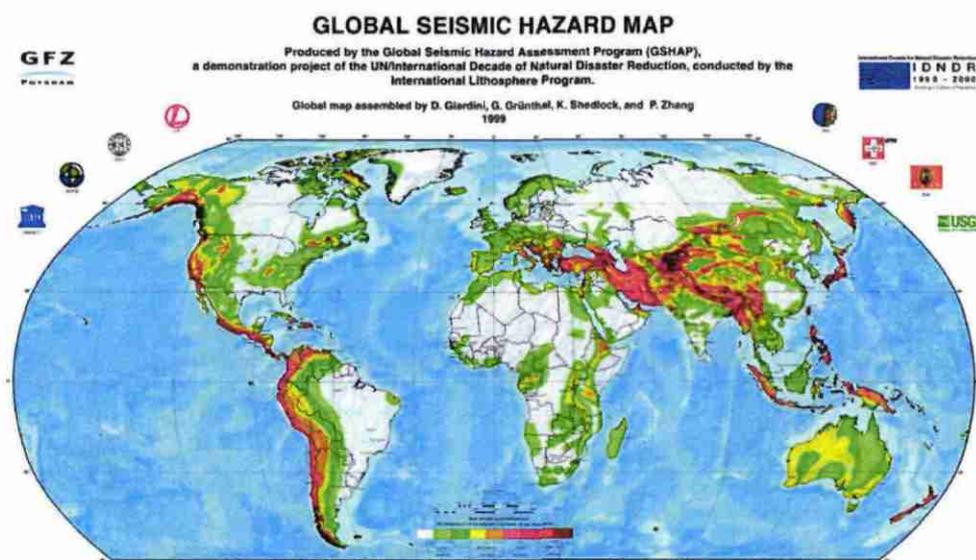
Source : Ph. Lognonné Institut de Physique du Globe de Paris, 2007

Illustration 13 : Schéma de principe de la formation d'un tsunami suite à un séisme sous marin (In Tsunami : Origine, Physique et Observations Philippe Lognonné Institut de Physique du Globe de Paris, Séminaire ENS Lyon, 08/06/2007)

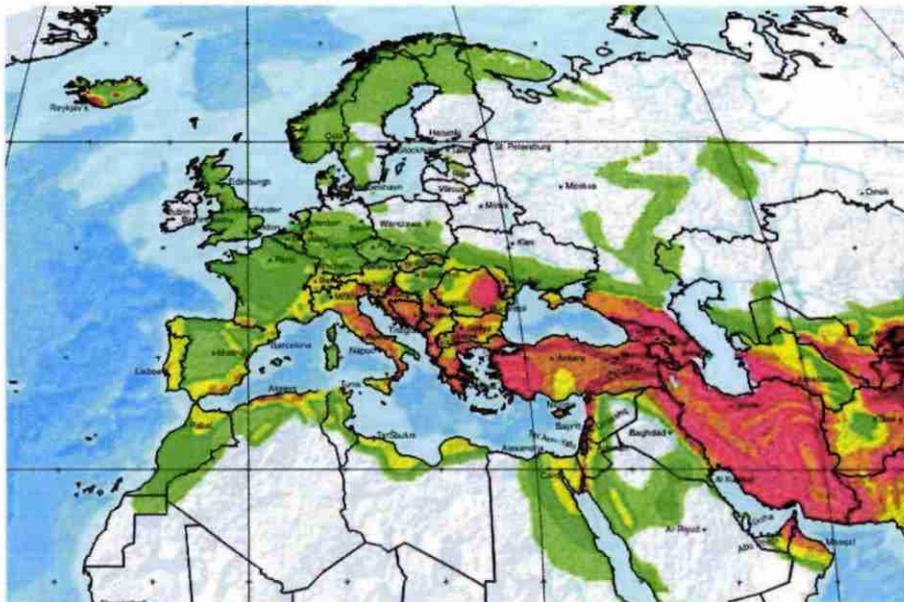
Ainsi donc, pour qu'un séisme soit potentiellement à l'origine d'un tsunami, il faut qu'il développe suffisamment d'énergie (au dessus d'une magnitude de 6 environ) et que cette énergie s'accompagne d'un déplacement suffisant du plancher océanique. Ceci explique que le nombre de tsunamis engendrés est exceptionnellement bas au regard du nombre de séismes enregistrés dans le monde. Il n'en reste pas moins vrai que la majeure partie (1649) des 2261 événements recensés est reliée à un tremblement de terre, selon les données du NOAA.

3.1.1. Sismicité locale

L'Europe nord-occidentale et plus particulièrement la France bénéficient d'une sismicité faible (Illustration 14)



a) Carte sismique globale du monde



b) Détail sur l'Europe

Source : Geoforschung Zentrum Potsdam, <http://www.gfz-potsdam.de>

Illustration 14 : Carte d'alea sismique du monde (a) et de l'Europe (b). L'alea est indiqué par les couleurs, du blanc (zones continentales stables) au rouge foncé (zones fortement sismiques) (Giardini et al, 1999).

L'inventaire réalisé pour la Région Nord Pas de Calais dans le cadre de la réactualisation du plan séisme (Sisfrance, 2005, Rey, 2007) documente quelques épisodes sismiques dans la région et les zones limitrophes (Illustration 15).



Source : SISFrance <http://www.sisfrance.net/>

Illustration 15 : Inventaire sismique de la région du Nord de la France

Plus précisément, pour la région Nord Pas de Calais, on dénombre ainsi 9 événements sismiques ayant leur épicentre dans le département du Nord et 6 dans le Pas de Calais (Sisfrance, 2008). Le nombre de séismes ressentis dans le Nord et le Pas de Calais (dont les épicentres ne sont pas forcément tous localisés dans la région) s'élève quant à lui à 65, dont 35 dans le département du Nord et 28 dans le Pas de Calais. La région ne présente pas de sismicité importante, susceptible de générer des tsunamis. En effet, pour générer potentiellement un tsunami, il faut que le séisme ait lieu en mer, et qu'il s'accompagne d'un mouvement de la croûte vertical suffisant pour provoquer la mise en mouvement de la masse d'eau. Or, ces deux conditions n'ont pas été réunies simultanément jusqu'à présent.

3.1.2. Facteurs favorisant

En plus des conditions sur la nature des mouvements sismiques en mer, la formation des tsunamis champ lointain les plus dévastateurs nécessite la présence d'une colonne d'eau importante. Ce n'est pas le cas pour notre région où la profondeur au large des côtes est d'environ 50 m. Un tsunami généré dans cette zone serait forcément champ proche ayant donc un impact limité dans l'espace.

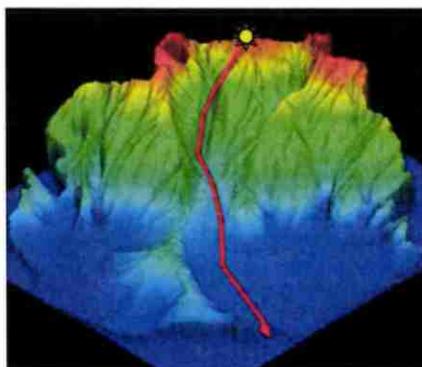
A noter que le tsunami champ lointain de Lisbonne 1755 aurait été perçu en Grande Bretagne (mais pas sur les côtes françaises métropolitaines). Le séisme à l'origine de

ce tsunami était de magnitude 8,7 (Richter, 1960), à 200 km au large environ, à grande profondeur (environ 2000 m). La vague qui a déferlé sur les côtes portugaises n'a cependant pas eu d'effet sur le littoral régional, où aucun témoignage ne relate de phénomène particulier à cette époque. Cet événement avait pourtant fait l'objet de témoignages en France, par Voltaire (Poème sur le désastre de Lisbonne, 1756), à l'origine d'ailleurs d'une polémique avec Rousseau (Lettre sur la Providence, 1756), et n'était donc pas inconnu.

3.2. LES GLISSEMENTS DE MASSE

Les glissements de masse, quand ils sont suffisamment importants, peuvent générer des tsunamis. En mer de Norvège, la zone de Storegga est considérée comme ayant été le siège d'un glissement de terrain sous-marin qui a généré des trains de vagues ressentis sur les côtes d'Islande, des îles Féroé, de Scandinavie et de Grande Bretagne, il y a près de huit mille ans. (Illustration 10).

Plus près de nous, un glissement de terrain sous-marin a provoqué un tsunami de plusieurs mètres sur environ 100 km de littoral de la Côte d'Azur le 16 octobre 1979. Cette catastrophe a occasionné plusieurs décès. Elle a eu pour origine le glissement en masse de remblais accumulés lors des travaux de remblaiement de l'aéroport de Nice, le long du talus continental qui se trouve dans ce secteur très près de la côte. Les études réalisées après cette catastrophe ont montré qu'elle avait pour origine une avalanche sous-marine issue du glissement en haut de pente, qui avait emprunté le canyon sous-marin, puis la vallée sous-marine du Var pour finalement se disperser dans la plaine abyssale au pied de la pente continentale corse (Illustration 16)



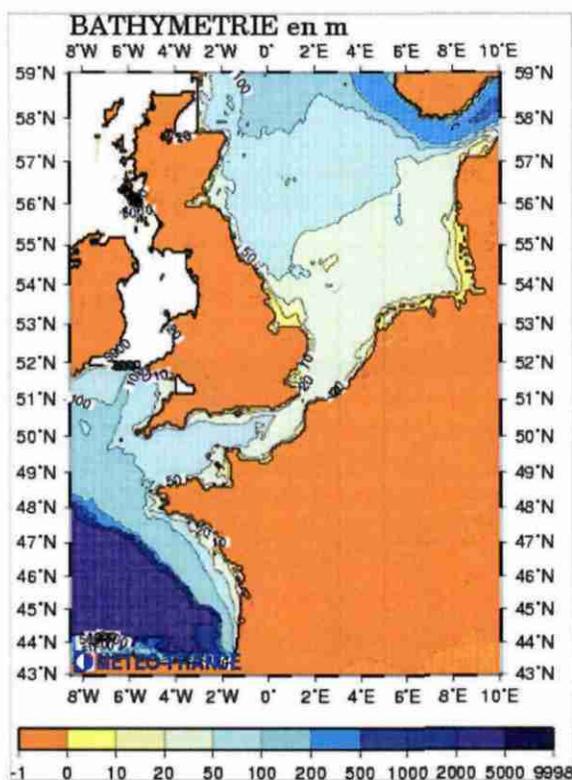
Source : IFREMER, Géosciences Marines, Laboratoire Environnements Sédimentaires, Plouzané, France

Illustration 16 : Trajet sous marin du glissement de Nice du 16 octobre 1979 (B. Savoye et al, 2006)

Pour qu'un phénomène de ce type survienne, il faut pouvoir mobiliser un volume important de sédiments, et le mettre en mouvement le long d'une pente, comme un talus continental. C'est le plus souvent un séisme ou une éruption volcanique qui donnent la première impulsion, mais le glissement peut s'initier suite à une perturbation provoquée par des travaux comme à Nice en 1979, ou sous son propre poids, dans des zones de forte accumulation sédimentaire : l'empilement de sédiment au bord du talus continental peut finir par se déstabiliser sous l'effet de la surcharge de matériaux meubles charriés par les fleuves.

3.2.1. En Région Nord Pas de Calais

Le littoral de la région Nord Pas de Calais est situé sur le plateau continental, loin du talus (Illustration 17) et il n'y a donc pas de pente au large de côtes qui permettrait un glissement en masse.



Source : Météo France http://www.meteorologie.eu.org/mohty/bathymetrie/d_gama.html, d'après S.H.O.M 2003

Illustration 17 Bathymétrie de la Manche et de la Mer du Nord (Source : SHOM 2003)

Il y a également peu d'accumulation de sédiments dans le détroit du Pas de Calais. Une étude détaillée du relief sous-marin (Gupta et al, 2007) montre que le détroit est sillonné de paléo-vallées orientées sud-ouest / nord-est qui représentent des couloirs d'érosion naturels (Illustration 18)

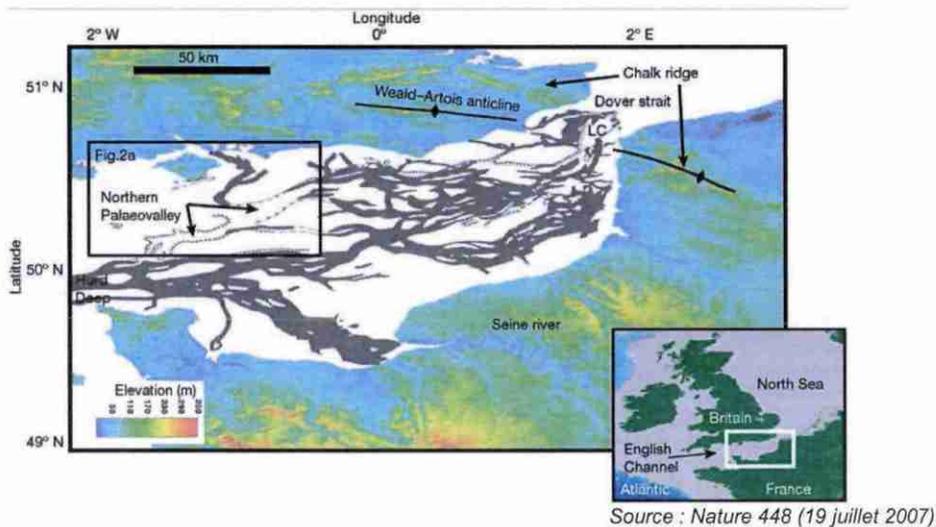


Illustration 18 : Paléo-vallées du détroit du Pas de Calais. En gris, vallées comblées par des sédiments, en hachuré et en blanc, vallées dépourvues de sédiments (dans Gupta et al, 2007)

L'absence de pentes et d'accumulations sédimentaires instables rendent peu plausible la formation de glissements sous-marins susceptibles de s'accompagner d'un tsunami dévastateur au large des côtes de la région. Enfin, la position géographique des côtes les place également en position abritée par rapport à un éventuel glissement au niveau du talus continental en Atlantique ou en mer de Norvège.

3.2.2. Facteurs favorisant

Le mécanisme de formation du train de vagues dans le cas d'un glissement sous-marin de masse est différent de celui des tsunamis d'origine sismique où le déplacement initial de l'eau par la rupture de faille a une échelle spatiale très large et un mouvement très rapide.

Dans le cas d'un glissement gravitaire sous-marin, l'échelle spatiale est beaucoup plus réduite et le mouvement dure plus longtemps, mais, contrairement à ce qui se passe pour les tsunamis d'origine tectonique, l'amplitude des vagues générées par un glissement sous-marin (ou un glissement de terrain à la mer ou un éboulement en masse) est d'autant plus grande que la tranche d'eau est faible. Il existe des

approches empiriques pour évaluer la hauteur de la vague à la côte par rapport au volume du bloc glissant (Sue et al, 2006), ou pour évaluer l'énergie de la vague par rapport à l'énergie potentielle du bloc glissant.

La faible profondeur caractérisant la bathymétrie locale est un facteur qui pourrait favoriser la formation de vagues en cas de glissement sous-marins massifs. Il ne s'agirait pas dans ce cas d'éboulements ponctuels liés à l'érosion des côtes, mais bien de masses importantes de sédiments ou de roches : le volume impliqué dans le glissement sous marin de Nice en 1979, est évalué à 10 millions de m³. Dans ce cas, l'énergie potentielle mise en jeu n'est cependant pas comparable à celle des tsunamis champ lointain, et la capacité de pénétration à terre de ce type de vague est moindre, sauf si d'autres facteurs permettent d'augmenter encore l'énergie de la masse en mouvement.

Ainsi, pour amplifier les conséquences d'un glissement massif, il faudrait qu'il puisse entraîner des masses sédimentaires instables. On estime par exemple qu'à Nice, le glissement de 10 millions de m³ au départ, a concerné en fait environ 150 millions de m³ par entrainement de masses sédimentaires le long des pentes des canyons sous-marins (Savoie et al, op. cit). Au large des côtes de la région Nord - Pas de Calais il n'y a pas ces conditions susceptibles d'amplifier un éventuel mouvement de masse.

3.3. LES CHUTES DE BLOCS

Les chutes de blocs (falaises) peuvent provoquer localement un tsunami. Pour cela, il faut envisager un glissement en masse d'un grand volume de falaise (en général > à 600 000 m³). La chute de blocs sur la côte du Pas de Calais est peut-être une cause possible des vagues qui ont occasionné quelques dégâts dans le port de Boulogne et de Calais en 1858, mais il apparaît peu probable que les éboulements qui peuvent survenir dans les zones côtières qui nous concernent mobilisent des volumes suffisants pour générer des tsunamis dévastateurs. Le risque de tsunami généré par la chute de blocs serait donc faible.

3.4. LES CHUTES DE METEORITES

On pense qu'une chute de météorite en mer pourrait générer un tsunami. Cependant, nous ne disposons pas de données sur un tel phénomène, celui-ci n'ayant pas une occurrence suffisante dans le passé pour avoir matière à l'évaluer.

Le « cratère » de Silverpit (Illustration 8), seul indice possible dans la région, fait l'objet de vifs débats dans la communauté scientifique quant à son origine véritable.

3.5. LES ERUPTIONS VOLCANIQUES

Les éruptions volcaniques en milieu marin sont susceptibles de provoquer des tsunamis. Ceux-ci peuvent subvenir lorsque le phénomène volcanique s'accompagne de l'effondrement de l'édifice (Japon, 1792 volcan Unzen, Indonésie, 1883 volcan Krakatoa, ou Alaska, 1883 volcan Augustine), ou lorsqu'il s'accompagne de coulées massives de lahars ou de pyroclastites en mer (Martinique, 1902 volcan de la Montagne Pelée). L'absence de volcanisme dans la région du Nord et du Pas de Calais exclut l'imminence d'un risque de ce type.

4. Modélisation

La modélisation de la génération d'un tsunami, de sa propagation à travers les océans et de l'inondation côtière qui en résulte nécessite de prendre en compte un grand nombre de facteurs, dont certains ne peuvent qu'être estimés, et fait appel à des codes de calculs complexes. Pour que ces outils puissent produire des résultats utilisables sur une zone donnée, il faut être en mesure de les caler sur des données issues de retours d'expérience suffisamment documentés. Ils seront par conséquent plus particulièrement utiles dans les zones bien documentées, mais risquent d'apparaître faussement performants, en particulier en matière de prédiction, dans les zones où on ne dispose pas du recul suffisant pour les caler.

On peut cependant, par transposition avec des zones où les modèles ont pu être suffisamment contraints, tenter de tester des hypothèses concernant des zones peu ou pas documentées, mais l'exercice nécessite quand même de gérer des incertitudes importantes

Des approches simplifiées, voire simplistes, sont parfois proposées en première approche pour évaluer le potentiel de pénétration d'une vague de type tsunami dans les terres.

La précision de ces approches simplifiées à l'extrême ne permet pas d'espérer autre chose que des ordres de grandeurs et ne font certainement pas des outils prédictifs.

Federici et al, (2006), puis Cannata et al (2007) proposent une approche simplifiée de l'évaluation de la submersion des côtes destiné au dimensionnement de mesures de gestion par les pouvoirs publics. Il s'agit d'un module de calcul développé pour s'intégrer dans le logiciel de cartographie et d'information géographique GRASS (Geographic Resource Analysis Support System) et présenté lors du 6^e congrès des utilisateurs de GRASS à Lausanne. Selon ces auteurs, ce module aurait fourni des résultats intéressants pour la gestion des côtes ligures (Federici et al, 2006) et s'appliquerait également bien à d'autres cas, comme les Caraïbes (Cannata et al. 2007).

Les données d'entrées sont généralement facilement disponibles :

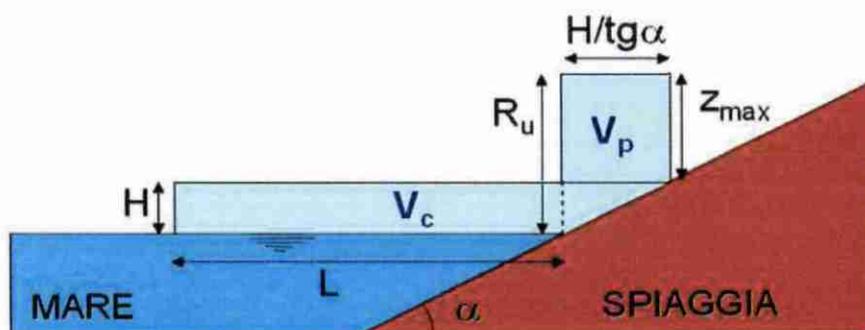
- Modèle numérique de terrain ;
- Carte de l'occupation des terres ;
- Carte du linéaire côtier ;
- Hauteur de la vague au droit de l'épicentre ;

- Hauteur de la tranche d'eau au droit de l'épicentre ;
- Hauteur de la tranche d'eau au niveau de la côte.

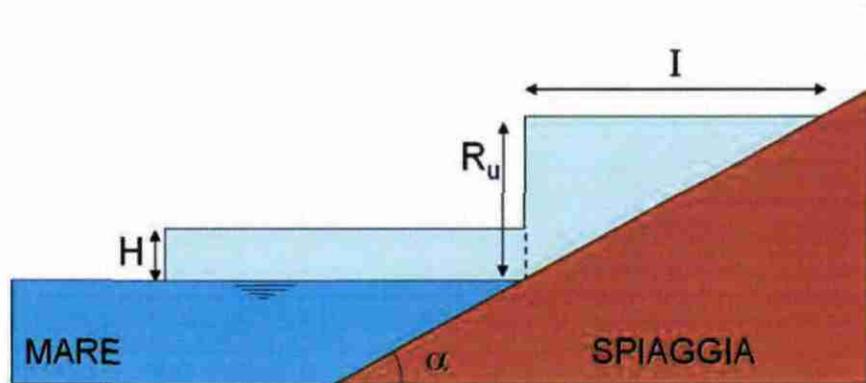
Les simplifications du modèle (Illustration 19) ne permettent pas d'en faire un modèle destiné à la prévision, mais suffisant pour dimensionner des mesures de gestion, selon leurs auteurs. Ainsi, le modèle simplifié considère :

Que l'onde est schématisée par une onde rectangulaire correspondant à la première vague ;

- Que la première vague est la plus destructrice ;
- Les effets du reflux ne sont pas pris en compte ;
- Le front d'onde est toujours parallèle à la ligne de côte ;
- L'effet de baie ou de détroit n'est pas pris en compte ;
- Toute l'énergie de l'onde se transforme instantanément en énergie potentielle en arrivant sur la côte ;
- La perte d'énergie de la vague sur la côte pendant la submersion est négligée.



a)

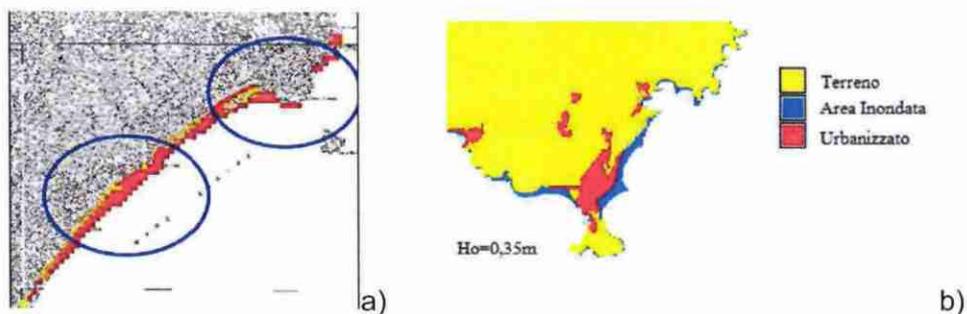


b)

Source : Cannata et al, 2007

Illustration 19 : Schéma conceptuel du modèle simplifié pour figurer la surcote (a) et la submersion (b) (Cannata et al, 2007)

La simplicité du module permet de l'associer à un système d'information géographique qui gère les données cartographiques, et restitue le résultat sous forme de cartes (Illustration 20).



Source : Federici et al, 2006 (a) ; Cannata et al, 2007 (b)

Illustration 20 : Exemple de restitution cartographique de la submersion. a) zoom sur la région de Bergeggi sur la côte ligure, constituée de plages planes (entouré bleu en bas) et de falaises rocheuses (entouré bleu en haut). Les parties submergées sont cartographiées en rouge et en jaune, correspondant à la superposition de différentes conditions à l'épicentre (Federici et al, 2006) ; b) Ile de Sainte Lucie. Les zones inondées sont cartographiées en bleu. H_0 est la hauteur de la vague au départ de l'épicentre situé aux Îles Vierges de 1867 (Cannata et al, 2007)

Dans l'exemple de Sainte Lucie, différents scénarios correspondant à des épisodes historiques (séisme des Îles Vierges en 1867, de Grenade (éruption du volcan Kick-em Jenny en 1936) et celle de la Soufrière à Saint Vincent en 1902.

A chaque fois, trois hypothèses ont été faite sur la hauteur de la vague à l'épicentre (cette information n'est pas documentée), pour élaborer des cartes correspondant à différents scénarios. Dans leur publication, les auteurs résument sous forme d'un tableau synthétique les caractéristiques de la vague à la côte pour ces différents scénarios, au point correspondant au pire cas (hauteur de crête), en fonction de la topographie de la côte (Illustration 19)

| | Ho [m] | H[m] | Run-up max [m] |
|----------------|--------|-------|----------------|
| Virgin Islands | 0.35 | 1.65 | 10.60 |
| | 0.45 | 2.13 | 11.00 |
| | 0.55 | 2.60 | 11.50 |
| Grenada | 0.1 | 0.187 | 12.8 |
| | 0.3 | 0.561 | 10.7 |
| | 0.5 | 0.934 | 10.3 |
| St Vincent | 0.25 | 0.75 | 10.4 |
| | 0.35 | 1.04 | 10.3 |

Source : Cannata et al, 2007

Illustration 21 : Synthèse des différents scénarios testés pour chacun des trois événements. Ho : hauteur initial de la vague au niveau de l'épicentre ; H : hauteur du shoaling ; Run-up max : Hauteur maximale du run-up (extrait de Cannata et al, 2007)

Il est également possible de restituer ces résultats, en compilant les équations utilisées par Cannata et al. 2007 dans une feuille de calcul (Illustration 22).

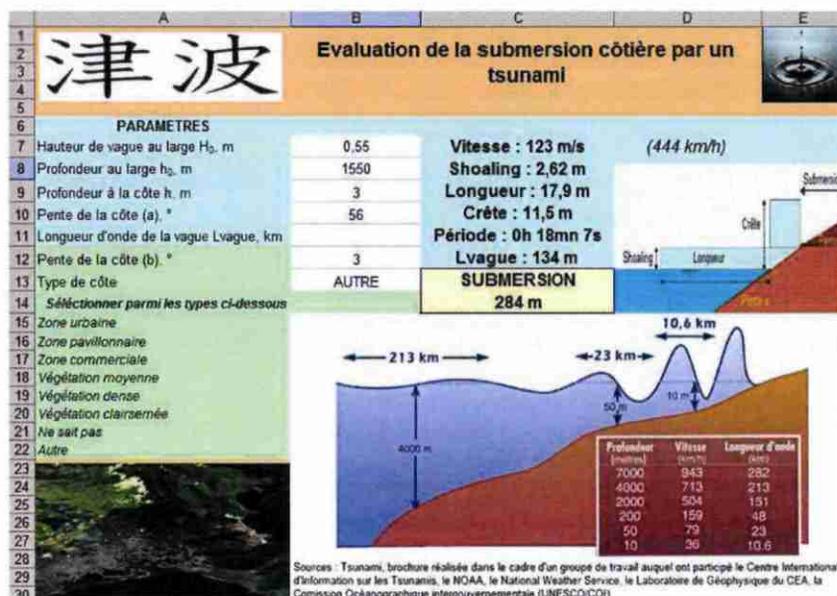
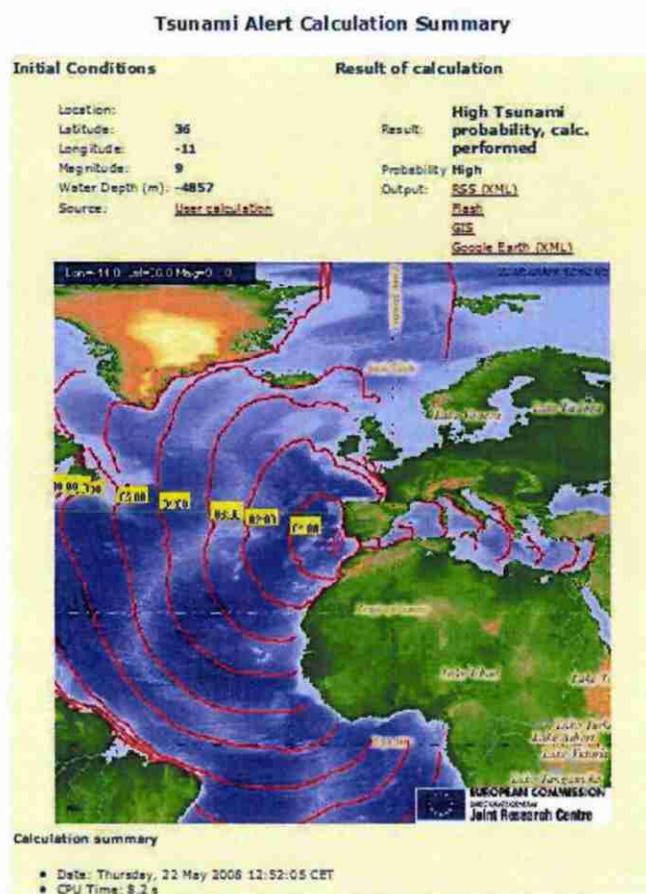


Illustration 22 : Copie d'écran d'une feuille de calcul appliquant l'approche simplifiée de Cannata et al, 2007

Ce genre d'outil est pertinent, en première approche, si l'on respecte ses limites. En particulier, il est complètement inadapté comme outil de prévision. A titre d'exemple, l'événement de Lisbonne en 1755 aurait été évalué comme devant se traduire par un envahissement des côtes en appliquant simplement le calcul simplifié, alors que rien n'a été détecté ou reporté à l'époque. Cela provient du fait que le modèle simplifié suppose que toute vague générée quelque part arrive sur la côte. Or cela ne tient pas compte de la position particulière de la côte dans la région, qui n'est pas directement ouverte sur les océans.

Le Joint Research Centre (JRC) de la Direction Générale de la Commission Européenne développe un modèle de simulation des tsunamis (JRC Travel Time Tsunami Model, d'Annunziato et Best, op. cit.) destiné à prévoir l'arrivée éventuelle d'un tsunami suite à un événement lointain en tout point des côtes européennes, pour être intégré dans un système d'alerte rapide intégré aux réseaux de surveillance sismiques mondiaux. Ce modèle a été implémenté sur un site web (<http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>). Ce modèle a été testé en y introduisant la localisation du séisme de Lisbonne en 1755 (NOAA) en lui attribuant une magnitude de 9. Au bout de quelques seconde, une carte de propagation de la vague est calculée (Illustration 23), et un rapport peut être envoyé par courrier électronique.



[JRC Tsunami Model](#) - JRC/IPSC/SES
 Source : Tsunami Propagation Model by A. Annunziato, C. Best - JRC/IPSC/SES
<http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>

Illustration 23 : Carte de propagation d'un tsunami localisé au large de côtes portugaises. Noter que, contrairement à l'approche simplifiée qui aurait calculé une submersion, alors que la région n'est pas concernée par la vague (d'après <http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>, JRC/IPSC/SES)

Ce type de modélisation peut être utilisée pour évaluer la vulnérabilité des côtes de la région à différents scénarios potentiels.

Ainsi, un tsunami consécutif à un séisme majeur au large des Etats-Unis atteindrait la Manche mais ne serait pas détecté au niveau des côtes du Nord et du Pas de Calais, car le train d'onde s'amortit fortement au niveau du plateau continental (Illustration 24)



Source : Tsunami Propagation Model by A. Annunziato, C. Best - JRC/IPSC/SES
<http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>

Illustration 24 : Propagation d'un tsunami potentiel à partir d'un séisme majeur au large des Etats-Unis (d'après <http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>, JRC/IPSC/SES).

En simulant un séisme de magnitude supérieure à 7 dans le détroit du Pas de Calais, le modèle prévoit l'arrivée possible d'un tsunami au niveau des côtes (Illustration 25).



Source : Tsunami Propagation Model by A. Annunziato, C. Best - JRC/IPSC/SES
<http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>

Illustration 25 : Propagation d'un tsunami potentiel à partir d'un séisme majeur au large dans le détroit du Pas de Calais.

A noter que la carte n'est produite que pour un séisme hypothétique de magnitude supérieure à 6, et suppose par défaut que tout séisme de grande ampleur est susceptible de générer un tsunami. Or, pour cela, il faut que qu'un déplacement vertical de la croûte accompagne le séisme, ce qui n'est pas toujours le cas.

En supposant que ceci se produise un jour, un calcul simplifié permet d'évaluer les caractéristiques de la vague de crête résultante au niveau de la côte, pour différentes configurations topographiques (Illustration 26)

| Pente de la côte (°) | 0,1 | | 0,5 | | 1,0 | | 1,5 | |
|----------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| | Crête (m) | Inondation (m) |
| 1 | 1,6 | 92 | 2,3 | 132 | 3,5 | 201 | 4,8 | 275 |
| 3 | 2,6 | 50 | 2,9 | 56 | 4 | 77 | 5,2 | 100 |
| 5 | 3,3 | 38 | 3,4 | 19 | 4,4 | 51 | 5,5 | 63 |

Illustration 26 : Résultat du calcul de la hauteur maximale théorique de crête (m) et de profondeur d'inondation (m) pour différentes configurations topographiques théoriques et pour différentes hauteurs théoriques de vague initiale, en utilisant une approche simplifiée de Cannata et al. 2007 . Les valeurs sur fond vert correspondent aux scénarios les moins irréalistes. Le calcul suppose une conservation totale de l'énergie des vagues lorsqu'elles atteignent la côte. La pente émergée est considérée ici identique à la pente immergée.

5. Conclusion

Le potentiel destructeur des tsunamis, quand ils frappent une côte où vivent des populations, justifie que l'on se pose la question de la vulnérabilité des zones côtières à ce type d'aléa.

C'est pour évaluer la vulnérabilité potentielle des côtes du littoral de la région Nord-Pas de Calais que la DIREN a demandé au BRGM de procéder à une étude bibliographique sur la plausibilité de voir un jour un tsunami déferlé sur le côte.

Cette étude a montré que pour qu'apparaisse un tsunami, plusieurs conditions devaient être réunies simultanément, telles que l'occurrence d'un séisme de forte magnitude en mer avec un mouvement vertical de la croûte terrestre, certains cas d'éruptions volcaniques ou le glissement à la mer (ou sous-marin) de grosses quantités de matériaux.

L'examen des données historiques disponibles montrent qu'on n'a qu'une connaissance assez inégale de tous ces phénomènes, dont les occurrences, même si elles sont parfois spectaculaires et frappent les esprits, ne sont pas habituelles.

La sismicité locale, faible mais pas nulle, ne présente pas les caractéristiques requises pour générer un tsunami : les zones d'instabilité crustale, où des mouvements verticaux des plaques tectoniques peuvent être générés, ne se situent pas au large des côtes du Nord et du Pas de Calais.

Par ailleurs, le littoral régional, du fait de sa position géographique, semble être protégé de l'arrivée de trains d'ondes d'origine lointaine, car aucun enregistrement anormal n'est reporté dans la région lors des épisodes de tsunamis majeurs qui se sont produits dans le monde.

De même, la topographie du plancher marin sur la plate-forme continentale, et l'absence de déversements massifs de sédiments en pro-deltas potentiellement instables rendent peu plausible la possibilité de générer des glissements de masse sous marins susceptibles de générer des tsunamis.

Si le risque de survenance d'un tsunami sur les côtes régionales ne peut être considéré comme nul, il n'est pas quantifiable du fait que nous ne disposons pas de données l'ayant déjà précisément décrit dans la région, hormis deux épisodes en 1811 et 1858 qui sont connus au travers de relations journalistiques. Il ne peut pas représenter une préoccupation majeure au regard des autres risques auxquels la région se trouve habituellement confrontée.

6. Bibliographie

- ANNUNZIATO A. ET BEST C. (2005)** - The tsunami event analysis and model. European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 42 p.
- AROUET F.M. (1756)** - Poème sur le désastre de Lisbonne ou examen de cet axiome "tout est bien".
- BONDEVIK, S., SVENDSEN J.I. ET MANGERUD J. (1997)** -Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegga tsunami in shallow marine basins and coastal lakes, western Norway. *Sedimentology*, 44, 1115-1131
- CANNATA M., FEDERICI B ET MOLINARI M. (2007)** - Mappe di inondazione dovute a tsunami mediante il Gis GRASS: applicazione all'isola di St. Lucia, Caraibi - GRASS Meeting Palermo, 14 - 16 février 2007
- FEDERICI B. ET COSSO T. (2006)** - Tsunami inundation maps and damage sceneries through the GIS GRASS. Conference Free and Open Source Software for Geoinformatics, Lauzanne, 11 - 15 septembre 2006 (<http://www.foss4g2006.org>)
- FEDERICI B., BACINO F. COSSO T. POGGI P. REBAU D ENGO LANDÀ L. ET SGUERSO D. (2006)** - Analisi del rischio tsunami applicata ad un tratto della costa Ligure. VII Meeting degli utenti italiani di GRASS, Genève 23 - 24 février 2006
- GIARDINI D., GRÜNTAL G., SHEDLOCK K. ET ZHANG P. (1999)** - Global Seismic Hazard Map. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP), United Nations International Decade of Natural disaster Reduction, International Lithosphere Program
- GUPTA S., COLLIER J.S. PALMER-FELGATE A. ET POTTER G. (2007)** - Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel. *Nature*, 418, 19 juillet 2007, p. 342 - 346
- INTERNATIONAL INSTITUTE OF EARTHQUAKE ENGINEERING AND SEISMOLOGY.** http://www.iiees.ac.ir/English/index_e.asp
- LAMBERT J.,** avec la collaboration de Daniels P. (2006) – Inventaire des tsunamis historiques en France. Rapport final. BRGM/RP-55132-FR, 19 p., 13 fig. "
- LAMBERT J. (1997)** - Les tremblements de terre en France. BRGM Editions
- LOGNONNE P. (2007)** - Tsunami : Origine, Physique et Observations. Présentation Séminaire ENS Lyon, 08 juin 2007

METEO FRANCE, 2007 - site internet <http://www.meteorologie.eu.org/mothy>

PEDREROS R. ET POISSON B. 2007. Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne : modélisation numérique des tsunamis. BRGM/RP-55760-FR, 176 p., 123 fig., 27 tabl., 2 ann.

REY J., avec la collaboration de Dewez T. et Lambert J. (2007) - Carte de l'aléa sismique par l'approche statistico-historique. Rapport final. BRGM/RP-54983-FR. 59 p., 21 fig., 4 tabl.

ROUSSEAU J.J. (1756) - Lettre à Voltaire sur la Providence

SAVOYE B., SULTAN N. ET DAN G. (2006) - Risque de tsunamis en Méditerranée occidentale. Cours et Séminaires de la Chaire Géodynamique du Collège de France, Forum de l'Europôle de l'Arbois 19-20 juin 2006 Aix en Provence

SIS FRANCE. Relevé et caractéristiques des séismes historiques et contemporains en France (<http://www.sisfrance.net>)

Site internet du JRC/IPSC/SES (<http://tsunami.jrc.it/model/model.asp>,)

STEWART S.A. ET ALLEN P.J. (2002) - A 20-km-diameter multi-ringed impact structure in the North Sea. Nature, 418, 1, August 2002, 520-523

UNDERHILL, J.R. (2004) - An alternative origin for the 'Silverpit crater'. Brief Communications Arising. Nature 428, (18 Mars 2004)

UNIVERSITY OF WASHINGTON, DEPARTMENT OF EARTH AND SPACE SCIENCE, page internet Tsunami!. <http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html>

US DEPARTMENT OF COMMERCE, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, NATIONAL ENVIRONMENTAL SATELLITE DATA AND INFORMATION SERVICE, NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER. http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

US DEPARTMENT OF COMMERCE, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, WEST COAST AND ALASKA TSUNAMI WARNIG CENTER. Tsunami Statistics, (wcatwc.arh.noaa.gov/tsustats.pdf)

US GEOLOGICAL SURVEY, Earthquake Hazard Program. Earthquake Facts and Statistics (<http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/eqstats.html>)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Nord - Pas de Calais
Synergie Park
6^{ter} rue Pierre et Marie Curie
59260 – Lezennes - France
Tél. : 03 20 19 15 40