

Fabrice Arduin

34 ans, marié, deux enfants

Kerven, Beg Avel, route de Beaufort
29 810 Plouarzel

E-mail : arduin@shom.fr

Né le 23 avril 1975 à Carcassonne, France.

Sur le web:

http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/vagues.htm

<http://www.previmer.fr/vagues>

<http://surfouest.free.fr>



Curriculum Vitae

Education

- 1992:** Baccalauréat série C, mention très bien, lycée Jean Durand, Castelnaudary.
1996: DEUG Langues et Civilisations Etrangères (LCE) – Anglais, Université Paris III
1997: Ingénieur de l'Ecole Polytechnique, Palaiseau, France
1998: Entrée dans le Corps des Ingénieurs de l'Armement, option recherche, diplôme d'études approfondies, océan-atmosphère-biosphère, Université Paul Sabatier, Toulouse.
2001: Doctorat en océanographie physique, Naval Postgraduate School, Monterey, Californie.
 Sujet: Evolution de la houle sur le plateau continental. Directeur: Thomas H. C. Herbers.
2005: Habilitation à diriger des recherches, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.
 Sujet: états de mer et dynamique de l'océan superficiel.

Expériences de recherche

avril-sept. 1997 et aout 1998 : Stage de recherche à l'Université des Iles Baléares, Palma de Mallorca, Espagne: étude des effets de canyons sous marins sur les courants de pente.

mars-juin 1998 : étude des flux entre le plateau du Golfe du Lion et le large, associés à la formation d'eaux denses (Laboratoire d'Aérodologie, Toulouse).

décembre 1998-aout 2001: étude de la transformation de la houle sur le plateau continental de Caroline du Nord (Département d'Océanographie, Naval Postgraduate School, Monterey, CA).

Octobre 2001 – décembre 2009: ingénieur d'études et recherches au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), à Brest. Activités: encadrement de programmes de R&D pour le compte de la Marine Nationale et de la Délégation Générale pour l'Armement, et activité de recherche appliquée pour les besoins du service.

Principales réalisations:

- Développement de système d'observation et modélisation pour les vagues et courants littoraux (programme EPEL: 2002-2005) avec campagnes à la mer et étude des interactions vagues-courants. (sponsor: Marine Nationale)
- Acquisition, installation et exploitation d'un système de radars haute fréquence en mer d'Iroise (2004- ...) pour l'étude de la dynamique de l'océan superficiel en temps réel: financement DGA et CPER Bretagne.
- Définition, financement, et co-organisation de la campagne "ECORS 2008": étude de l'évolution morphodynamique d'une plage, avec la participation de plus de 100 chercheurs et ingénieurs.
- Développement de modèles théoriques puis numériques pour la prévision des états de mer, mise en oeuvre dans un cadre opérationnel, et validation (2000- ...): financement DGA, ANR et U.S. Office of Naval Research.
- Développement d'un cadre théorique et pratique pour l'étude des interactions vagues-courants-turbulence. (2004- ...): financement DGA et ANR.

Prix et distinctions

1997: Prix d'option de l'Ecole Polytechnique, département de Mécanique (travail sur la circulation dans un canyon sous-marin, publié en 1999 dans le Journal of Geophysical Research).

1999: "outstanding student paper award", Fall AGU general assembly, San Francisco: travaux sur la couche limite de fond sous les vagues (publié en 2001 dans le Journal of Physical Oceanography).

2000: "outstanding student paper award", Fall AGU general assembly, San Francisco: étude de la réflexion des vagues par la topographie (publié en 2002 dans le Journal of Fluid Mechanics).

2008: Nicholas P. Fofonoff Award from the American Meteorological Society "For theoretical and observational research on the interaction of ocean surface waves with the sea floor and ocean currents, and developing accurate coastal wave prediction models." (prix pour chercheurs de moins de 40 ans)

2008: Journal of Physical Oceanography Editor's Award "For many well-considered, constructive, and timely reviews."

2009: Lauréat d'une bourse "jeune chercheur" du Conseil Européen de la Recherche (<http://erc.europa.eu/>), pour un projet de 4 ans "Approche interdisciplinaire des vagues pour des applications à la géophysique et l'ingénierie" (IOWAGA), accueilli à l'Ifremer.

2009: Lauréat du prix "Christian Le Provost Océanographe"

Organisation de colloques

- member of the Waves In Shallow Environment (WISE) steering committee (colloque annuel, 16ème édition à Brest en 2010, pour la première fois en France)
- organisation de "Waves and Operational Oceanography" (WOO2003, à Brest, France)
- co-organisateur des sessions 2006 "Nearshore" sessions at the AGU "Ocean Sciences" conference (120 abstracts).
- co-organisateur de "Waves and Operational Oceanography 2007" (WOO2007 in Brest, France)

Sujets de recherche:

Dynamique des vagues et leurs interactions avec la terre solide (transport sédimentaire, bruit sismique), la colonne d'eau (turbulence, dérive, oscillations inertielles), et l'atmosphère (flux air-mer, télédétection).
Prévision opérationnelle des vagues et courants de surface.

Enseignement:

- responsable d'un module "vagues" dans le cours de 3ème année de l'ENSIETA
- enseignant à ENSTA et Université Paris VI dans le cadre de la 2ème année de master (parcours "côtier").

Encadrement de doctorants et post-doc:

Rudy Magne (2002-2005, thèse de doctorat, dirigée par Vincent Rey, ISITV, Toulon): réflexion des des vagues par la topographie

Nicolas Rasclé (2004-2007, thèse de doctorat): Impact des vagues sur la circulation océanique.

Vincent Marieu (2006-2008, thèse de doctorat à l'UMR EPOC, dirigée par Philippe Bonneton):
Modélisation morphodynamique des rides de sable.

Jean-François Filipot (2007 - ..., thèse de doctorat): Statistiques de déferlement et dissipation de l'énergie des vagues.

Clément Gandon (2008 - ..., thèse de doctorat au SHOM et UMR EPOC): Circulation en trois dimensions dans la zone de déferlement

Gilles Guitton (2008- ..., thèse de doctorat à l'Ifremer/LOS): mesure des vents forts par satellite

Anne-Claire Bennis (2008- ..., post-doc au SHOM, dans le cadre du projet ANR "EPIGRAM"): échanges entre la zone littorale et le plateau interne.

Autres activités scientifiques:

Revue de projets pour la U.S. National Science Foundation, Florida Sea Grant, Oregon Sea Grant, MEDDAT, ANR

Revue d'articles scientifiques pour Journal of Geophysical Research, Journal of Fluid Mechanics, Journal of Physical Oceanography, Marine Systems, Ocean Dynamics, Ocean Modelling, Geophysical Research Letters ...

Vulgarisation et transfert:

- Contributions à la version 3.14 du code WAVEWATCH III (TM) distribuée par le service météorologique des Etats-Unis (NOAA/NCEP/NWS).
- pages internet sur la science des vagues,
http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/vagues.htm
- mise à disposition du public de prévision de vagues (depuis 2002) sur le site <http://surfouest.free.fr>, (1000 visites/jour en moyenne) et gestion du système de prévision des vagues dans le cadre du projet Prévimer (<http://www.previmer.org/> , plus de 1000 visites par jour pour les pages “vagues”, soit 97% des visites sur Prévimer).
- contributions à Wikipedia (houle, vague, état de mer, houlographe ...)

Collaboration en cours avec:

- Bertrand Chapron (Ifremer/LOS) et Fabrice Collard (CLS): mesure des courants et de la houle depuis l'espace
- Eléonore Stutzmann (IPGP, Paris) et Fabrice Collard (CLS): analyse conjointe des mesures de houle par satellite (SAR et altimètre) et par le bruit sismique (réseau GEOSCOPE).
- Aron Roland (T.U. Darmstadt, Allemagne): développement et validation de méthodes numériques pour la modélisation des vagues en zone côtière et littorale
- Ad Reniers (Rosentheil School for Marine Science, Miami), Franck Dumas (Ifremer/DYNECO), Luigi Cavaleri (ISMAR, Venise), Augustin Sanchez-Arcilla (UPC, Barcelone), Philippe Bonneton (UMR EPOC, Bordeaux) et Yann Leredde (Géoscience Montpellier): modélisation couplée vagues-courants en zone côtière et littorale
- Frédéric Bouchette (Géoscience Montpellier): modélisation des paléo-environnements lacustres dans le Sahel actuel
- Alexander Babanin (Swinburne University, Australie), Francesco Fedele (Georgia Tech, Etats-Unis) Vladimir Dulov (MHI, Ukraine), Vladimir Kudryavtsev (NIERSC, Russie), Bertrand Chapron et Nicolas Reul (Ifremer, LOS): mesure et interprétation des probabilités de déferlement des vagues.
- Gerben Ruessink (University of Utrecht): rôle des évènements extrêmes pour les inondations dans le climat futur

Publications dans des revues à comité de lecture

1. **Ardhuin, F.**, J.-M. Pinot, and J. Tintoré, **1999**, Numerical study of the circulation in a steep canyon off the Catalan coast (western Mediterranean), *J. Geophys. Res.*, **104**(C5), 11115-11135.
2. **Ardhuin, F.**, T. H. C. Herbers, and W. C. O'Reilly, **2001**, A hybrid Eulerian-Lagrangian model for spectral wave evolution with application to bottom friction on the continental shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, **31**(6), 1498-1516.
3. **Ardhuin, F.**, and T. H. C. Herbers, **2002**, Bragg scattering of random surface gravity waves by irregular sea bed topography, *J. Fluid Mech.*, **451**, 1-33.
4. **Ardhuin, F.**, T. G. Drake et T. H. C. Herbers, **2002**, Observation of wave-generated vortex ripples on the North Carolina continental shelf, *J. Geophys. Res.*, **107** (C10), DOI:10.1029/2001JC000986.
5. **Ardhuin, F.**, W.C. O'Reilly, T.H.C. Herbers & P.F. Jessen, **2003a**, Swell transformation across the continental shelf. Part I: Attenuation and directional broadening, *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 1921-1939.
6. **Ardhuin, F.**, T.H.C. Herbers, W.C. O'Reilly, & P.F. Jessen, **2003b**, Swell transformation across the continental shelf. Part II: validation of a spectral energy balance equation, *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 1940—1953.
7. **Ardhuin, F.**, B. Chapron and T. Elfouhaily, **2004**, Waves and the air-sea momentum budget, implications for ocean circulation modelling, *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 1741—1755.

8. **Ardhuin, F.**, F. R. Martin-Lauzer, B. Chapron, P. Craneguy, F. Girard-Ardhuin and T. Elfouhaily, **2004**, dérive à la surface de l'océan sous l'effet des vagues, *Comptes Rendus Géosci.*, **336**, 1121—1130.
9. **Ardhuin, F.**, A. D. Jenkins, D. Hauser, A. Reniers et B. Chapron, **2005**, Waves and operational oceanography : Toward a Coherent Description of the Upper Ocean , *Eos*, **86** (4), 37—39.
10. **Ardhuin, F.**, and T.H.C. Herbers, **2005**, Numerical and physical diffusion: Can wave prediction models resolve directional spread? *J. Ocean Atmos. Tech.*, **22** (7), 883—892.
11. Chapron, B., F. Collard and **F. Ardhuin**, **2005**, Direct measurements of ocean surface velocity from space: interpretation and validation, *J. Geophys. Res.*, **110**, C07008.
12. Magne, R., **F. Ardhuin**, V. Rey et T. H. C. Herbers, **2005**, Topographical scattering of waves: a spectral approach, *Journal of Port Waterways, Coastal and Ocean Engng*, **131**(6), 311—320, <http://arxiv.org/abs/physics/0504148>
13. Collard, F., **F. Ardhuin**, et B. Chapron, **2005**, Extraction of coastal ocean wave fields from SAR images, *IEEE-Journal of Ocean Engineering*, **30**(3), 526—533.
14. Magne, R., V. Rey et **F. Ardhuin**, **2005**, Measurement of wave scattering by topography in presence of currents, *Physics of Fluids*, **17**, 126601.
15. **Ardhuin, F.**, et A. D. Jenkins, **2006**, On the interaction of waves and upper ocean turbulence, *J. Phys. Oceanogr.*, **36**(3), 551-557.
16. Rasclé, N., **F. Ardhuin**, et E. A. Terray, **2006**, Drift and mixing under the ocean surface. Part 1: a coherent one-dimensional description with application to unstratified conditions, *JGR*, **111**, C03016, doi:10.1029/2005JC003004.
17. **Ardhuin, F.**, **2006**, On the momentum balance in shoaling gravity waves: a commentary of 'Shoaling surface gravity waves cause a force and a torque on the bottom' by K. E. Kenyon, *J. Oceanogr.*, **62**, 917—922.
18. Magne, R., K. Belibassakis, T. H. C. Herbers, **F. Ardhuin**, W. C. O'Reilly et V. Rey, **2007**, Evolution of surface gravity waves over a submarine canyon, *J. Geophys. Res.*, **112**(C1), C01002.
19. The Mediterranean Wave Modelling group: **Ardhuin, F.**, L. Bertotti, J. Bidlot, L. Cavaleri, V. Filipetto, J.-M. Lefevre, P. Wittmann, **2007**, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea, *OE*, **34**, 526—541.
20. **Ardhuin, F.**, T. H. C. Herbers, G. Ph. van Vledder, K. P. Watts, R. Jensen et H. Graber, **2007**, Slanting fetch and swell effects on wind wave growth, *J. Phys. Oceanogr.*, **37** (4) , 908—931
21. Guyonic, S, M. Mory, T. Wever, **F. Ardhuin** and T. Garlan, **2007**, Full scale mine burial experiments in wave and current environments, *IEEE-Journal of Ocean Engineering*, **32**(1), 119—132.
22. **Ardhuin, F.**, et Magne, R., **2007**, Current effects on scattering of surface gravity waves by bottom topography, *J. Fluid Mech.*, **576**, 235—264.
23. The WISE group, **2007**, Wave modelling – the state of the art, *Progress in Oceanogr.*, **75**, 603—674.
24. **Ardhuin, F.**, N. Rasclé and K. A. Belibassakis, **2008a**, Explicit wave-averaged primitive equations using a Generalized Lagrangian Mean, *Ocean Modelling*, **20**, 235—264.
25. **Ardhuin, F.**, A. D. Jenkins et K. A. Belibassakis, **2008b**, Commentary on 'The Three-Dimensional Current and Surface Wave Equations' by George Mellor, *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 1340—1349
26. Marieu, V., P. Bonneton, D. L. Foster, and **F. Ardhuin**, **2008**, Modeling of vortex ripple morphodynamics, *JGR*, **113**, C09007, doi:10.1029/2007JC004659.
27. Rasclé, N., **F. Ardhuin**, P. Queffeuilou, and D. Croizé-Fillon, **2008**, A global wave parameter database for geophysical applications. Part 1: Wave-current–turbulence interaction parameters for the open ocean based on traditional parameterizations, *Ocean Modelling*, **25**, 154—171.
28. Rasclé, N., **F. Ardhuin**, **2009**, Drift and mixing under the ocean surface. Part 2: Stratified conditions and model-data comparisons, *J. Geophys. Res.*, **114**, C02016, doi:10.1029/2007JC004466.
29. **Ardhuin, F.**, B. Chapron, and F. Collard, **2009**, Strong decay of steep swells observed across oceans," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, p. L06607, 2009.
30. **Ardhuin, F.**, L. Marié, N. Rasclé, P. Forget, and A. Roland, **2009**, Observation and estimation of Lagrangian, Stokes and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface, *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 2820—2838.
32. Collard, F., **Ardhuin, F.**, B. Chapron, **2009**, "Routine monitoring and analysis of ocean swell fields using a spaceborne SAR," *J. Geophys. Res.*, **114**, C07023.
33. Vandenbulcke L., J.-M. Beckers, F. Lenartz, A. Barth, P.-M. Poulain, M. Aidonidis, J. Meyrat, **F. Ardhuin**, N. Pinardi, P. Oddo, L. Torrisi, S. Pasquini, J. Chiggiato, M. Tudor, J.W. Book, P. Martin, R. Allard, G. Peggion, M. Rixen, **2009**, Super-Ensemble techniques: application to surface

drift prediction during the DART06 and MREA07 campaigns, *Progress in Oceanography*, **sous presse**.

34. J.-F. Filipot, **F. Ardhuin**, and A. Babanin, A unified deep-to-shallow-water spectral wave breaking dissipation formulation. Part 1. Breaking probability, *J. Geophys. Res.*, **accepté**.
35. **Ardhuin, F.**, R. Magne, J.-F. Filipot, A. van der Westhuysen, E. Rogers, A. Roland, P. Queffeuilou, J.-M. Lefevre, L. Aouf, A. Babanin, and F. Collard, Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation at global scales., *J. Phys. Oceanogr.* **soumis**.

Conférences invitées

- 2004 Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, CA: Ardhuin, F., et al., Tools for forecasting in the coastal ocean a coherent hydrodynamic formalism for numerical models, and some first steps toward a consistent use of radar remote sensing.
- 2007 International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium, Ardhuin, F., Mixing and energy dissipation in the presence of surface gravity waves
- 2007 Gordon Research Conference on Coastal Ocean Modelling, New London, NH: Ardhuin, F. et al., Sea state and upper ocean dynamics

Projets de recherche actuels

1. Introduction

Dans le cadre des missions du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), mes travaux sur ces différents sujets se sont organisés autour du développement des méthodes de modélisation numériques des états de mer, pour la satisfaction des besoins des liés aux opérations militaires (en particulier amphibies) et de l'action de l'état en mer (dérive en surface, en particulier à la suite du naufrage du Prestige-Nassau). Il s'agissait en particulier d'explorer, parmi les thématiques délaissées par la recherche océanographique en France, les sujets susceptibles de faire avancer l'océanographie opérationnelle. Ces développements ouvrent une nouvelle ère d'applications pour la prévision des vagues, de la télédétection à la modélisation des courants à la surface de l'océan. En retour, ces travaux ne manqueront pas de fournir de nouvelles observations pour mieux contraindre les modèles et la compréhension des mécanismes physiques.

Ces efforts doivent se poursuivre, en traversant en particulier les limites des spécialités géophysiques afin de recueillir le bénéfice d'une modélisation intégrée et cohérente de tous les effets des états de mer, définissant ainsi un compartiment "vagues" à part entière dans les modèles du système Terre.

2. Généralités sur les états de mer

Les vagues sont, comme la marée, des ondes de gravité de surface, et donnent lieu aux phénomènes océanographiques parmi les plus visibles. La différence d'avec les autres ondes de surface vient de leur mode de génération, essentiellement sous l'effet du vent, qui donne des échelles relativement courtes, avec des longueurs d'ondes de quelques centimètres à 1 km, pour la partie la plus énergétique. La visibilité des vagues et leurs interactions avec de nombreux autres phénomènes océaniques permet aussi d'utiliser les vagues comme moyen de mesure – par télédétection – du vent, des courants, de la bathymétrie, ou bien même d'ondes internes. Les vagues ont aussi des effets très importants sur le niveau de la mer en zone littorale, l'érosion des côtes, le mélange et la dérive à la surface.

Les vagues jouent ainsi le rôle essentiel d'embrayage entre le moteur atmosphérique rapide, et la circulation océanique plus lente, avec un effet de régulation des échanges air-mer d'énergie mécanique, de quantité de mouvement et de gaz, y compris les gaz à effet de serre, ainsi qu'un rôle important pour la génération d'embruns et aérosols associés. Enfin, les vagues interagissent aussi avec la Terre solide, que ce soit par les processus sédimentaires sur les plateaux continentaux (Ardhuin et al. 2002, 2003), mais aussi par la génération du bruit de fond sismique qui demeure encore peu exploité (Bromirski et al. 1999).

3. Le contexte de ces travaux: des regards différents mais trop cloisonnés

Les vagues sont généralement étudiés pour des applications particulières par les océanographes, ingénieurs ou mathématiciens appliqués. La sécurité de la navigation a été une des raisons pour les nombreux travaux récents sur les vagues scélérates (e.g. Onorato et al. 2006), et l'évolution des modèles de prévision de l'état de la mer. En raison de ce penchant pour la navigation, les paramètres utilisés pour quantifier la qualité des modèles numériques se sont généralement cantonnés à la hauteur significative (H_s) et la période dominante (T_p) avec très peu de considération pour les propriétés directionnelles des vagues, qui sont pourtant très importantes pour la télédétection et l'interprétation du bruit sismique, ainsi que pour l'amplitude des vagues de petite échelle qui déterminent la signature de nombreux signaux mesurés par satellite. Cet état de fait est aussi le résultat du statut des organismes qui travaillent sur ces sujets, essentiellement les centres de prévision météorologiques, que ce soit en France et à l'étranger.

Jusqu'en aout 2008, le modèle le plus précis en termes de H_s et T_p était celui mis en oeuvre par le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) (voir Janssen 2008), grace à une prévision des vents, de grande qualité, l'assimilation des mesures des satellite altimétriques, et des paramétrages physiques raisonnables pour la génération, dissipation et évolution non-linéaire des vagues dominantes.

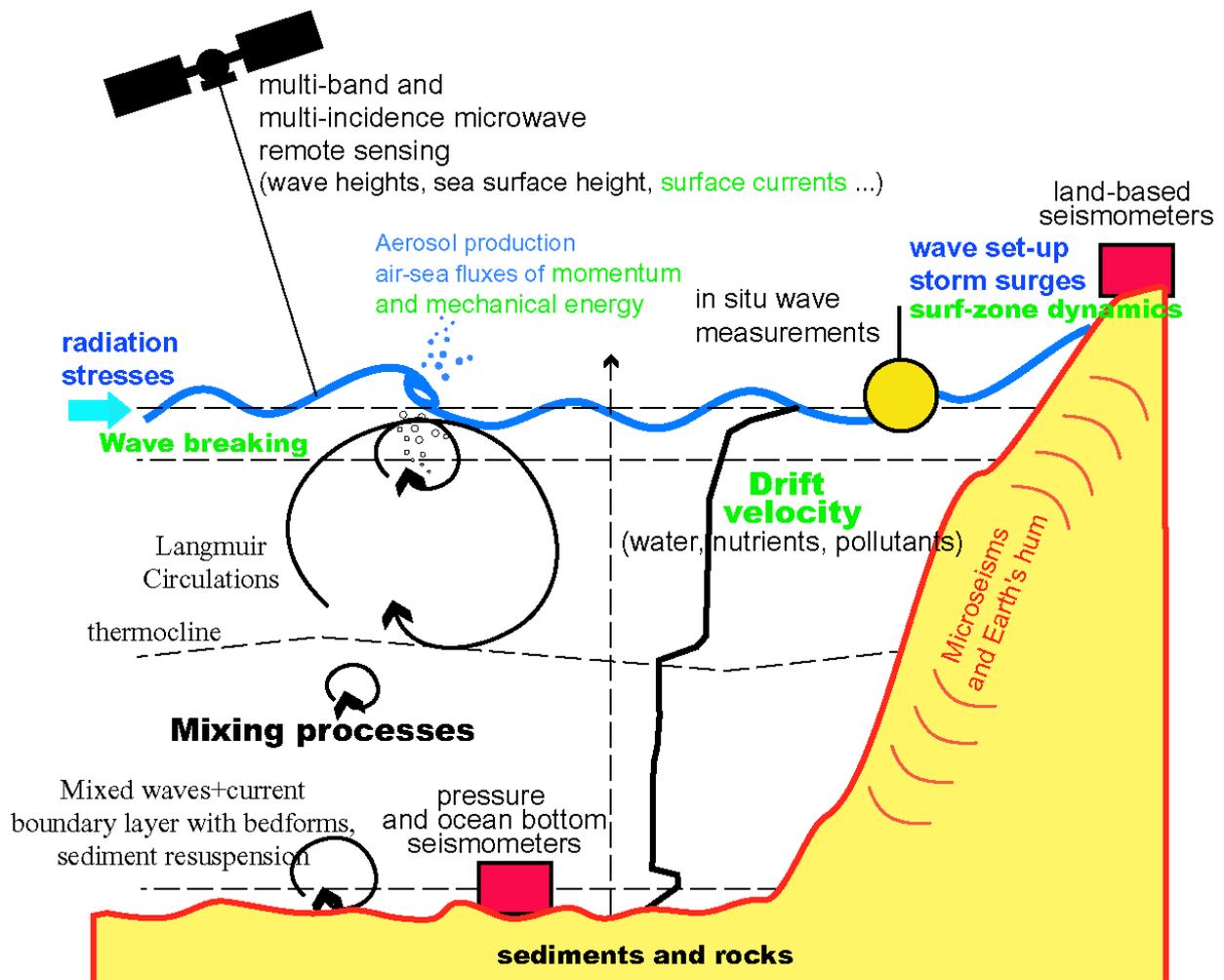


Figure 1 : Schéma général des différentes observations des vagues qui peuvent être réalisées, et des processus importants pour le système Terre, avec en particulier les mécanismes d'interaction avec la circulation océanique.

Après une analyse détaillée des faiblesses des paramétrages qui représentent l'évolution des états de mer (Ardhuin et al. 2007), j'ai montré, avec Bertrand Chapron (de l'Ifremer) et Fabrice Collard (de la société BOOST, désormais CLS), l'importance de la dissipation de la houle sur de grandes distances (Ardhuin et al. 2009a), et proposé une explication plausible (frottement air-mer) pour cette dissipation.

Ensuite cette dissipation de la houle a été paramétrée séparément des effets du déferlement. Le modèle ainsi mis au point a permis de réduire les erreurs d'environ 15% sur les paramètres H_s et T_p , mais surtout, d'estimer pour la première fois de manière fiable (figure 2) de nouveaux paramètres associés aux vagues courtes, et qui seront très utiles pour l'interprétation de mesures par télédétection: la dérive de Stokes en surface (U_{ss}) et la pente moyenne de la surface (mean square slope ou mss). Au passage, on peut signaler que le modèle a été intégré au système de prévision Prévimer (www.previmer.org) et, sans aucune assimilation de données, produit les meilleures prévisions de H_s et T_p (surpassant entre autres le CEPMMT, figure 3) pour les échéances de 24 et au delà, et dès l'analyse pour les zones Atlantique Nord-Est, Manche et Mer du Nord (voir par exemple <http://www.jcomm-services.org/documents.htm?parent=195>).

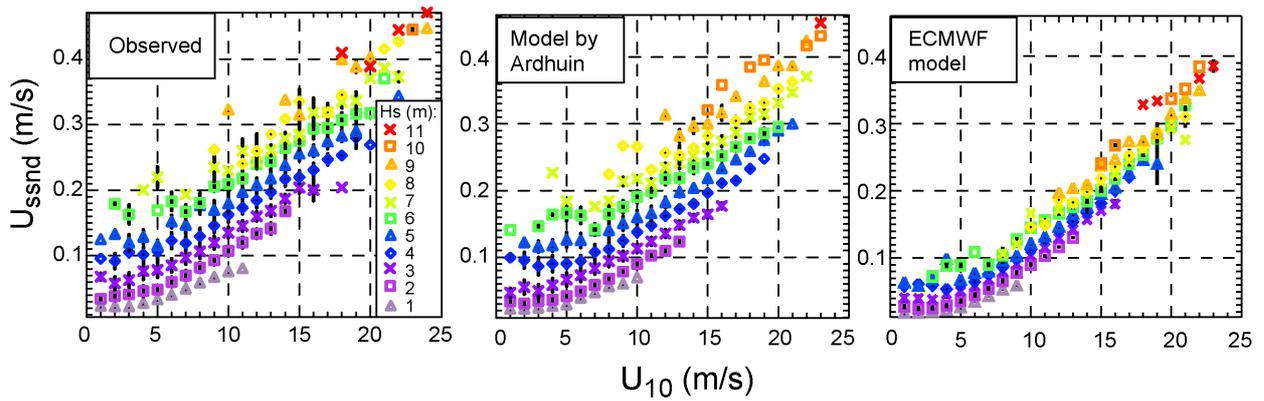


Figure 2 : Estimation de la dérive de Stokes induite par les vagues U_{ssnd} (sans prise en compte de la directionnalité) à partir d'état de mer mesuré par bouée (à gauche), du modèle développé par Ardhuin et al. (2009, au milieu) et du même modèle avec le paramétrage du CEPMMT (à droite). Ces résultats sont obtenus pour une bouée au large de la côte ouest des États-Unis, et sont représentative de tous les bassins océaniques. Les observations ont été moyennées sur 3 heures et combinées par classe de hauteur vagues (H_s) et vitesse du vent (U_{10}). Les barres d'erreur (en noir) donnent la moitié de la déviation standard pour chaque classe. Les modèles antérieurs, comme celui du CEPMMT, reproduisent très mal la variabilité de cette dérive avec la hauteur des vagues.

L'amélioration considérable de l'estimation des paramètres U_{ss} et m_{ss} vient d'une meilleure compréhension de la dynamique des vagues relativement courtes (longueurs d'ondes 3 à 10m).

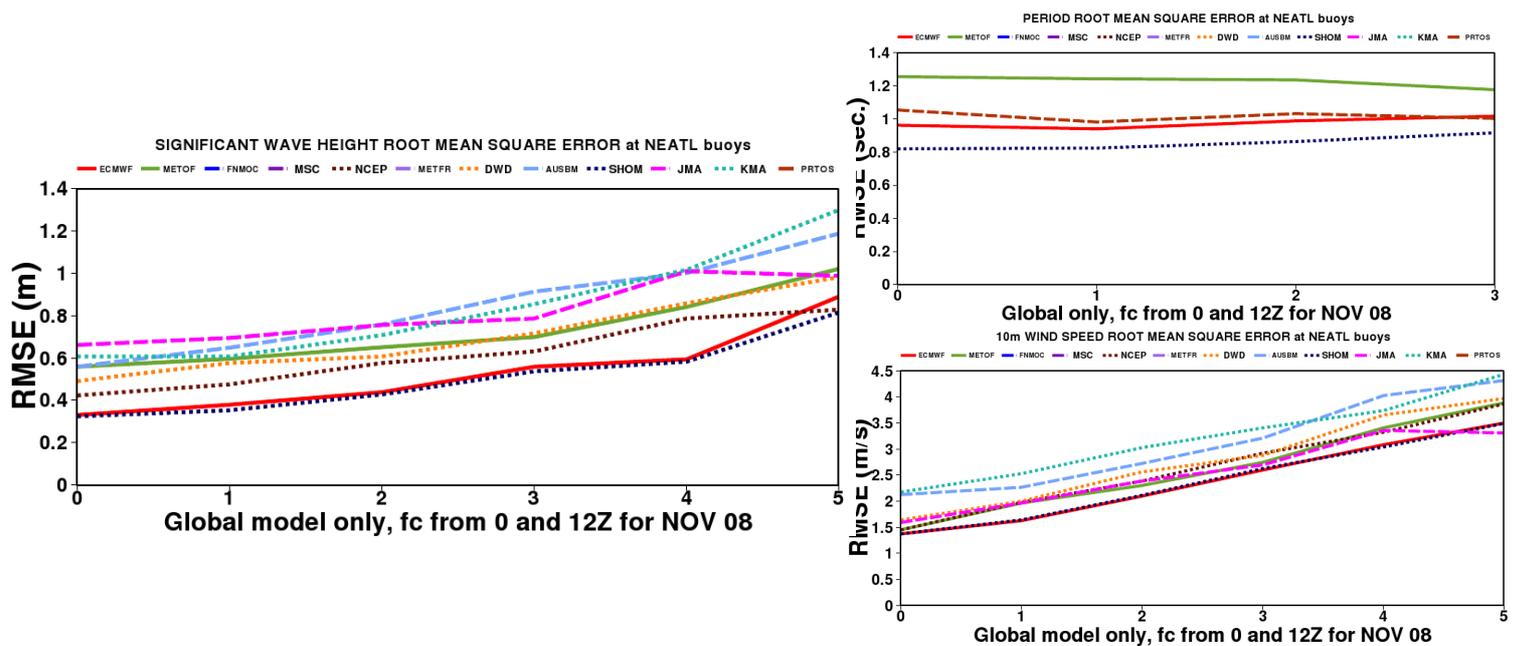


Figure 3 : Erreur moyenne quadratique pour la hauteur significative (H_s , à gauche) et la période moyenne (T_{m02} en haut à droite) en Atlantique Nord-Est, pour novembre 2008, en fonction de l'échéance de prévision (en jours: 0=analyse). Les modèles "ECMWF" (CEPMMT) et "SHOM" sont forcés par le même vent (CEPMMT), qui est le plus précis (en bas à droite). Les autres systèmes de prévision sont ceux du U.K. Met Office (UKMO), U.S. Navy (FNMOC), Meteorological Service of Canada (MSC), NOAA/NCEP (NCEP), Météo-France (METFR), German Weather Service (DWD), Australian Bureau of Meteorology (AUSBM), Japanese Meteorological Agency (JMA), Korean Met. Agency (KMA), Puertos del Estado (PRTOS). Figure fournie par J.-R. Bidlot (CEPMMT).

Des améliorations comparables sont attendues de l'analyse de mesures directionnelles des vagues, via l'interprétation des signaux microsismiques et grâce aux nouvelles missions spatiales CFOSAT et Sentinel, et de l'étude des propriétés statistiques de déferlement des vagues.

Or la dérive de Stokes est très importante pour la dérive de larve et polluants en surface, le mélange des couches de surface de l'océan (e.g. McWilliams et al 1997) et l'interprétation de mesures de courant par télédétection (Chapron et al. 2005, Mao and Heron 2008). Ainsi, le modèle de vagues a permis de déduire la contribution de la dérive de Stokes des mesures de

courant de surface faits par radar à haute fréquence (HF), et de vérifier ainsi (Ardhuin et al. 2009b) que le courant quasi-Eulérien (la dérive d'Ekman) est peu cisailé en surface avec une direction beaucoup plus oblique par rapport au vent que ce que prévoient les théories qui ne prennent pas en compte l'effet des vagues (Ekman 1905, Madsen 1977). Ces résultats sont déterminants pour une estimation correcte des flux d'énergie entre le vent et l'océan.

Les observations faites grâce aux radars HF acquis par le SHOM, montrent aussi l'importance de la variation de température sur la verticale pour l'intensité des courants de surface: ainsi, en mer d'Iroise, les courants induits par le vents sont les plus forts ... en juillet ou en août! Le vent y est plus faible qu'en hiver, mais cette différence est due à la présence d'eaux chauffées par le soleil qui glissent sur les eau plus froide de sub-surface.

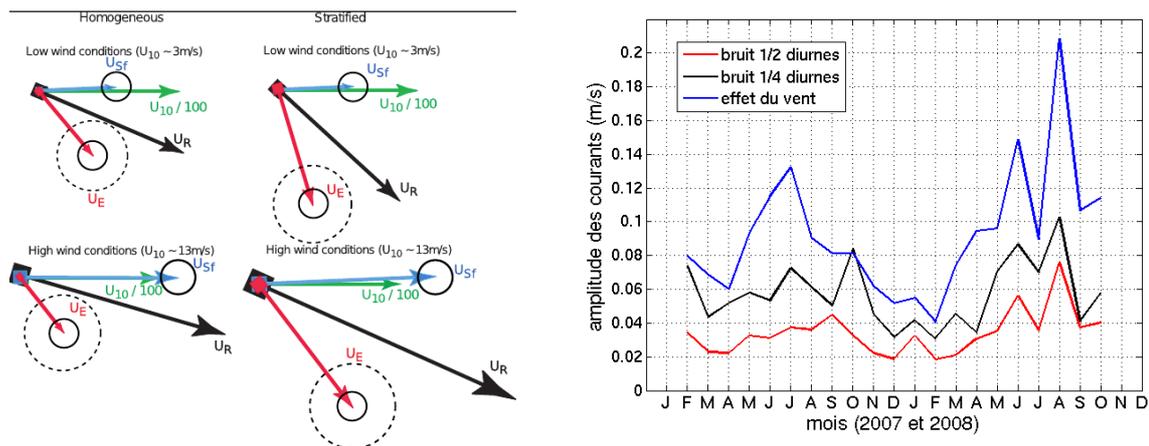


Figure 4 : A gauche: décomposition typique des vitesses de dérive U_R corrélées avec le vent en dérive de Stokes U_{Sf} (vitesse résiduelle du mouvement des vagues) et d'Ekman U_E , dans différentes conditions (Ardhuin et al. 2009b). A droite, évolutions des courants (hors marée barotrope) à la surface de la mer d'Iroise. Outre les courants induits par le vent (périodes plus longues que 14 heures), les mouvements de fréquence proche de M2 et M4 sont apparents. Ils sont probablement associés à la marée interne (études en cours).

La pente moyenne de la surface est elle un paramètre clef pour interpréter les mesures de température de brillance de la mer, et en déduire une salinité de surface, principe des futures mission spatiales SMOS et Aquarius (e.g. Boutin et al. 2004).

4. Les vagues et le génie côtier: quelle cohérence avec le large?

Par ailleurs, l'étude des états de mer se fait aussi pour des besoins de génie côtier (conception de digues, en particulier aux Pays-Bas, étude des phénomènes d'érosion des côtes, ...). Pour répondre à ce besoin, des paramétrages empiriques (e.g. van der Westhuysen et al. 2007) ont été proposés avec un ajustement à un ou quelques sites côtiers sans recherche de cohérence avec l'évolution des vagues à plus grande échelle.

Parce que ce sont les mêmes vagues qui influencent la sécurité de la navigation, la télédétection ou le génie côtier, il y a un fort besoin de cohérence dans l'analyse des observations et les modélisations numériques, ce à quoi je me suis attaché. Ainsi, le déferlement à la côte ou au large peuvent être vus comme des cas particuliers du même phénomène (Filipot et al. 2010), ce qui ouvre la voie à une modélisation cohérente du large à la côte. Ce même souci de cohérence existe pour la modélisation de courants littoraux forcés par la houle et l'interprétation du bruit sismique.

Pour certaines applications comme le mélange et la dérive à la surface de l'océan, ou bien l'étude de phénomène côtiers à partir d'information sur la houle au large, il est possible qu'un forçage de modèles de circulation ou de modèles côtiers sont suffisants, sans avoir besoin de faire appel à

un couplage qui utilise une rétroaction des courants ou niveaux d'eau sur les vagues. C'est pour permettre ces travaux que j'ai constitué une base de données de paramètres associés à la houle comme les flux d'énergie à la surface air-mer, la dérive en surface, outre les classiques paramètres d'état de mer (Rasclé et al. 2008):

<http://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/HINDCAST/>

Cette base de données a été étendue aux pentes de la surface (mss), utile pour la télédétection, aux flux d'énergie, utilisés pour l'implantation de centrales houlomotrices, avec des loupes régionales sur les côtes métropolitaines, les Antilles, la Polynésie Française. Elle est complétée toutes les 12h par l'ajout des prévisions réalisées dans le cadre du projet Prévimer.

5. Hydrodynamique côtière: de la théorie vers la pratique

La complexité de la dynamique littorale résiste encore largement à une modélisation quantitativement correcte du fait de la complexité des écoulements forcés par le déferlement des vagues. Si ce forçage est assez bien compris lorsqu'on intègre les équations du mouvement sur la verticale (Longuet-Higgins et Stewart 1964), la structure verticale du forçage demande une analyse plus complexe. Ainsi McWilliams et al. (2004) ont proposé un début de formalisme d'interaction vagues-courant sans prise en compte du déferlement. Par ailleurs, Mellor (2003) a proposé un jeu d'équation qui s'est avéré être erroné (Ardhuin et al. 2008b, Mellor 2008). J'ai donc reformulé (Ardhuin et al. 2008a) la théorie générale de Andrews et McIntyre (1978) pour le cas particulier des interactions vagues-courant-turbulence avec une première application à l'interaction vagues-turbulence (Ardhuin et Jenkins 2006).

Ainsi il apparaît clairement que la modélisation en trois dimension est plus facilement formulée en terme de vitesse quasi-Eulérienne (vitesse de dérive corrigée de la dérive de Stokes), ce qui évite de modéliser explicitement l'évolution complexe de la structure tri-dimensionnelle de la dérive de Stokes. Ce cadre théorique a permis par ailleurs de donner une interprétation physique des définitions mathématiques de McWilliams et al. (2004).

Des premières simulations de la circulation littorale fondées sur ce formalisme cohérent ont été réalisées par Nicolas Rasclé (2007) dans des cas académiques. Ce travail a été repris pour la thèse de Clément Gandon et devrait déboucher dès 2009 sur un système de modélisation couplée associant les codes WAVEWATCH III™ (Tolman 2008, Ardhuin et al. 2009) et MARS3D (développé à l'Ifremer) via le système de couplage PALM (développé au CERFACS). Cet outil servira en particulier à l'étude de plusieurs phénomènes: la structure des courants de baie en trois dimensions, les échanges littoral – plateau continental (pollutions d'origine marine ou terrestre), des surcôtes en Manche.

6. Mon projet: vers une étude intégrée et cohérente des états de mer pour les géosciences et les applications

Parce que l'océanographie en Europe est relativement éloignée de l'étude des états de mer, il existe un grand nombre de problèmes pratiques et scientifiques pour lesquels des collaborations fructueuses sont possibles, permettant ainsi d'apporter des réponses à des questions scientifiques et pratiques, et d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation. Une vision intégrée de ces différentes questions permettra de mieux comprendre les limitations des modèles d'état de mer et de les améliorer.

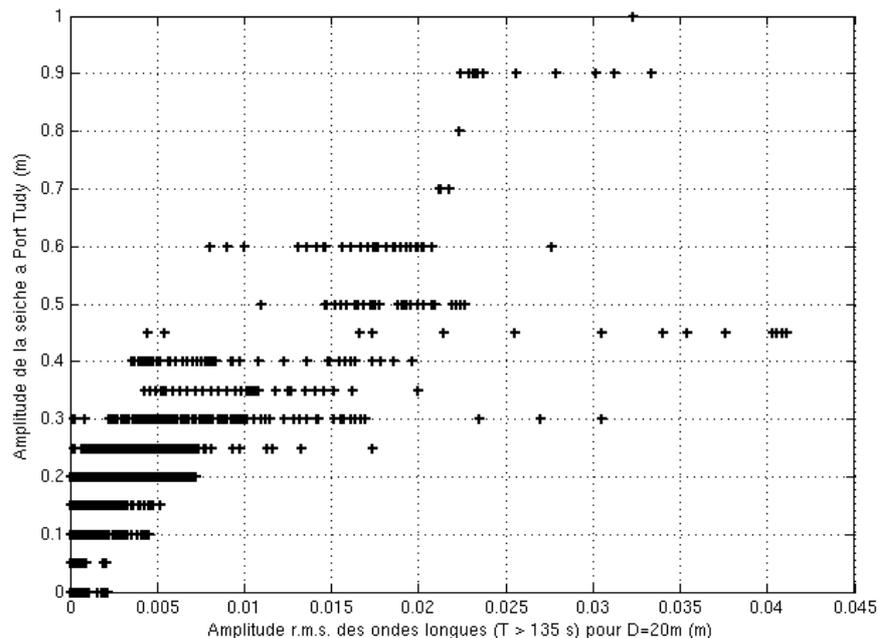


Figure 5 : Amplitude maximale des seiches heure par heure à Port Tudy (Ile de Groix), analysées par Emmanuel Devaux (stagiaire école TPE au SHOM), en fonction de l'amplitude moyenne des ondes longues forcées par les groupes de vagues, calculées à l'entrée du port de Lorient par les modèles d'état de mer mis en place dans le cadre de Prévimer. Pour une amplitude de plus de 10 cm, la corrélation est $r=0.81$.

C'est ainsi que je collabore avec de nombreux collègues qui ont une “problème de vagues” : que ce soit Lucia-Pineau Guillou (SHOM) pour expliquer l'amplitude des seiches dans le port de Port-Tudy (Ile de Groix, figure 4), Andres Vega et Serge Andrefouet (IRD) pour expliquer les flux de nutriments dans les lagons de Polynésie Française, Florent Lyard (CNRS) pour estimer les corrections liées aux états de mer sur les marégraphes côtiers, ou encore Nicolas Reul pour calculer la rétrodiffusion en bande L de la voie lactée sur la surface océanique afin de traiter les données de la future mission spatiale SMOS. Ces applications apparemment éparses sont les différentes tentacules d'un projet unique et cohérent qui vise à développer une modélisation précise des états de mer sous toutes leurs facettes. De façon rétroactive elles permettent aussi de mettre le doigt sur certaines faiblesses de la modélisation des états de mer. Ainsi, les seiches de Port-Tudy sont fortement ($r=0.81$) corrélées à l'amplitude estimée des ondes longues forcées par les groupes de vagues (figure 5). Or ce paramètre dépend fortement de la répartition de l'énergie des vagues en fonction des directions, qui est encore peu et mal mesurée et, a priori, assez mal représentée dans les modèles numériques.

S'il a été assez peu question de climat dans le présent mémoire, c'est que les premiers contacts pour améliorer les processus de mélange verticaux dans les modèles de circulation océanique n'ont pas été très fructueux. Mon apport s'est donc concentré sur l'étude des vitesses en surface en relation avec le mélange (Rasclé et al. 2006, Rasclé et Ardhuin 2009). Ces effets ayant été pris plus au sérieux pour la circulation côtière, c'est donc vers ces applications que je me suis d'abord tourné. Cependant l'effet du mélange sur la température de surface est un autre aspect important car il influe sur les échanges de chaleur entre océan et atmosphère un paramètre important du système climatique.

D'autres applications utilisent directement les résultats de la base de données de simulations ou des prévisions faites dans le cadre de Prévimer, depuis la pratique du surf et la pêche professionnelle ou de loisir, au dimensionnement d'ouvrages en mer.

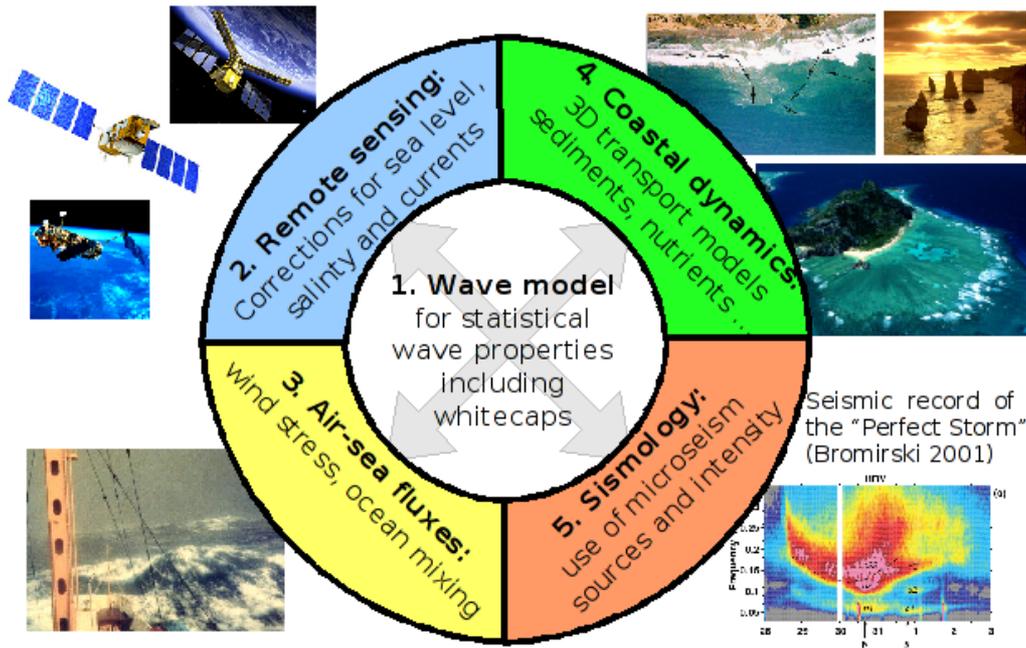


Figure 4 : Schéma d'ensemble d'un projet autour des vagues avec ses applications géophysiques.

Les trois axes principaux des développements en cours et à venir concernent la prévision des probabilités de déferlement et paramètres associés (couverture et épaisseur d'écume, flux de gaz), la circulation océanique en zone littorale et l'interprétation quantitative des données sismiques.

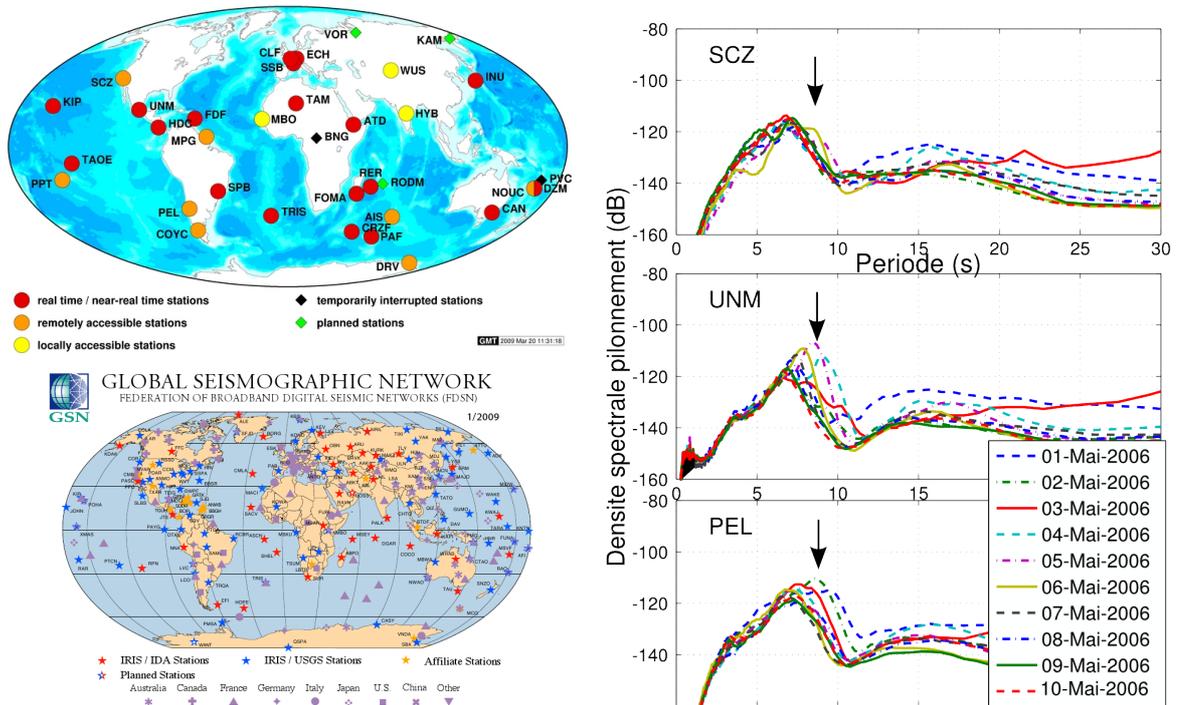


Figure 5 : Cartes des réseaux de sismographes large bande GEOSCOPE (IPGP) et autres réseaux internationaux et exemple de spectres de signaux sismiques sur la côte Pacifique américaine associés à l'arrivée de la houle d'une tempête. Cette tempête a généré la houle plusieurs jours auparavant, le 27 avril, dans les 50eme hurlants de l'océan austral. (données fournies par E. Stutzmann de l'Institut de Physique du Globe de Paris). La houle arrive d'abord au Chili (station PEL, dès le 2 mai), puis au Mexique à partir du 5 mai (station UNM) et en Californie (6 et 7 mai). On peut la suivre jusqu'en Alaska.

La couverture des réseaux sismographiques large bande (figure 5) est en effet tout à fait complémentaire des réseaux de mesure de houle, concentrés dans l'hémisphère nord. L'interprétation qualitative (événements de houle, voir figure 5), puis quantitative (Bromirski et al. 1999) demande encore un travail important, avec des applications potentielles intéressantes pour la prévision de la houle et l'analyse de la climatologie passée des événements météoro-océanographiques extrêmes, très bien visibles sur le signal sismique large bande (figure 5).

Bibliographie

- D. G. Andrews and M. E. McIntyre, "An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 89, pp. 609–646, 1978.
- Ardhuin, F., T. G. Drake et T. H. C. Herbers, 2002, Observation of wave-generated vortex ripples on the North Carolina continental shelf, *J. Geophys. Res.*, 107 (C10), DOI:10.1029/2001JC000986.
- Ardhuin, F., W.C. O'Reilly, T.H.C. Herbers & P.F. Jessen, 2003a, Swell transformation across the continental shelf. Part I: Attenuation and directional broadening, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1921-1939.
- F. Ardhuin and A. D. Jenkins, "On the interaction of surface waves and upper ocean turbulence," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 36, no. 3, pp. 551–557, 2006.
- F. Ardhuin, T. H. C. Herbers, K. P. Watts, G. P. van Vledder, R. Jensen, and H. Graber, Swell and slanting fetch effects on wind wave growth," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 37, no. 4, pp. 908-931, 2007.
- F. Ardhuin, N. Rasclé, and K. A. Belibassakis, "Explicit wave-averaged primitive equations using a generalized Lagrangian mean," *Ocean Modelling*, vol. 20, pp. 35–60, 2008a.
- F. Ardhuin, A. D. Jenkins, and K. Belibassakis, "Commentary on 'the three-dimensional current and surface wave equations' by George Mellor," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 38, pp. 1340–1349, 2008b.
- F. Ardhuin, B. Chapron, and F. Collard, Observation of swell dissipation across oceans," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, p. L06607, 2009a.
- F. Ardhuin, L. Marié, N. Rasclé, P. Forget, and A. Roland, Observation and estimation of Lagrangian, Stokes and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface," *J. Phys. Oceanogr.*, 2009, 39, 2820—2838.
- P. D. Bromirski, R. E. Flick, and N. Graham, "Ocean wave height determined from inland seismometer data: implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific," *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. C9, pp. 20753–20766, 1999.
- P. D. Bromirski, "Vibration from the Perfect Storm," *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 2, p. 2000GC000119, 2001.
- B. Chapron, F. Collard, and F. Ardhuin, "Direct measurements of ocean surface velocity from space: interpretation and validation," *J. Geophys. Res.*, vol. 110, no. C07008, 2005. doi:10.1029/2004JC002809.
- V. W. Ekman, "On the influence of the earth's rotation on ocean currents," *Ark. Mat. Astron. Fys.*, vol. 2, pp. 1–53, 1905.
- J.-F. Filipot, F. Ardhuin, and A. Babanin, "A unified deep-to-shallow water spectral wave breaking dissipation formulation. Part 1. Breaking probability," *J. Geophys. Res.*, pp. Submitted.
- P. A. E. M. Janssen, "Progress in ocean wave forecasting," *J. Comp. Phys.*, vol. 227, pp. 3572–3594, 2008.
- M. S. Longuet-Higgins and R. W. Stewart, "Radiation stress in water waves, a physical discussion with applications," *Deep Sea Research*, vol. 11, pp. 529–563, 1964.
- J. C. McWilliams, P. P. Sullivan, and C.-H. Moeng, Langmuir turbulence in the ocean," *J. Fluid Mech.*, vol. 334, pp. 1-30, 1997.
- J. C. McWilliams, J. M. Restrepo, and E. M. Lane, "An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters," *J. Fluid Mech.*, vol. 511, pp. 135–178, 2004.

- O. S. Madsen, “A realistic model of the wind-induced Ekman boundary layer,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 7, pp. 248–255, 1977.
- Y. Mao and M. L. Heron, “The influence of fetch on the response of surface currents to wind studied by HF ocean surface radar,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 38, pp. 1107–1121, 2008.
- O. S. Madsen, “A realistic model of the wind-induced Ekman boundary layer,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 7, pp. 248–255, 1977.
- G. Mellor, “The three-dimensional current and surface wave equations,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 33, pp. 1978–1989, 2003. Corrigendum, vol. 35, p. 2304, 2005.
- G. Mellor, “Reply,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 38, pp. 1351–1353, 2008.
- M. Onorato, A. R. Osborne, and M. Serio, “Modulational instability in crossing sea states: A possible mechanism for the formation of freakwaves,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, p. 014503, 2006.
- N. Raschle, F. Ardhuin, and E. A. Terray, “Drift and mixing under the ocean surface. a coherent one-dimensional description with application to unstratified conditions,” *J. Geophys. Res.*, vol. 111, p. C03016, 2006. doi:10.1029/2005JC003004.
- N. Raschle, F. Ardhuin, P. Queffelec, and D. Croizé-Fillon, “A global wave parameter database for geophysical applications. part 1: wave-current-turbulence interaction parameters for the open ocean based on traditional parameterizations,” *Ocean Modelling*, vol. 25, pp. 154–171, 2008. doi:10.1016/j.ocemod.2008.07.006.
- N. Raschle, *Impact des vagues sur la circulation océanique*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2007. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00182250/>.
- N. Raschle and F. Ardhuin, “Drift and mixing under the ocean surface revisited. stratified conditions and model-data comparisons,” *J. Geophys. Res.*, vol. 114, p. C02016, 2009. doi:10.1029/2007JC004466.
- A. J. van der Westhuysen, M. Zijlema, and J. A. Battjes, “Saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water,” *Coastal Eng.*, vol. 54, pp. 151–170, 2007.
- H. L. Tolman, “A mosaic approach to wind wave modeling,” *Ocean Modelling*, vol. 25, pp. 35–47, 2008.