ACTIVITE T1.1

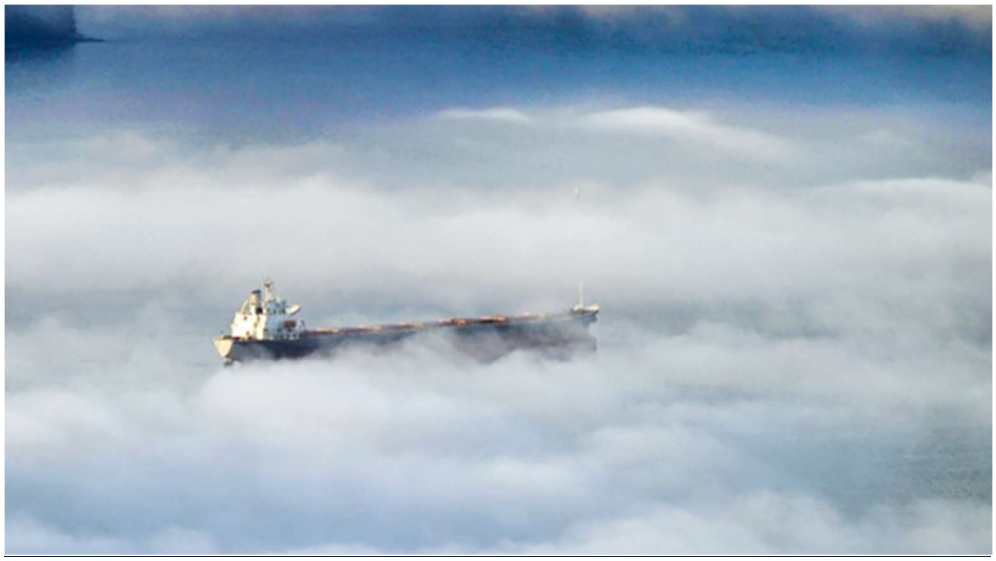
Identification des risques difficiles à prévoir liés aux actions atmosphériques et marines

Livrable T1.1.1

Rapport de reconnaissance sur les instruments d'évaluation des risques

Partenaire responsable:

Consorzio LaMMA



Ce rapport a été rédigé par:

Carlo Brandini

Alessio Innocenti

Bartolomeo Doronzo

Angelo Boccacci

Michele Bendoni

Massimo Perna

Valerio Capecchi

Giulio Betti

(Consorzio LaMMA)

Tania Del Giudice

(ARPAL)

PRÉFACE

L'objectif de ce rapport est de réaliser une enquête sur les principaux outils utilisés pour l'identification des risques difficilement prévisibles pour la navigation, avec une référence particulière aux risques météo-dépendants. Ces outils comprennent des observations (par le biais d'instruments in situ, d'observations radar et par satellite) et des modèles de calcul utilisés tant pour l'étude des phénomènes en temps réel que pour les études de la dynamique des fluides appliquée. La mise à disposition de ces outils est souvent confiée à des services de prévisions météorologiques, dont certains sont présents dans l'espace de coopération et notamment sont proposés par des organismes tels que ARPAL et le Consortium LaMMA, partenaires du projet GIAS.

Prévoir et réduire les risques d'origine météorologique et maritime.

À l'échelle mondiale, on estime que 30 % des accidents se produisent dans des conditions météorologiques défavorables (Aroucha et al., 2018), mais si on tient compte des accidents ayant des conséquences fatales, le pourcentage passe à 48 % (Weng & Yang, 2015). Pour la compréhension des phénomènes météorologiques et de leur évolution, l'utilisation des bulletins et de divers autres types de services météorologiques est cruciale car il est nécessaire d'accroître la connaissance de la façon dont ces aspects affectent la dynamique des navires (tant les grands navires que les bateaux de plaisance) et leur manœuvrabilité. Normalement, la plupart des conditions météorologiques peuvent être prévues un certain temps à l'avance (de l'ordre de 3 à 5 jours), comme c'est le cas pour les systèmes météorologiques associés à des perturbations atmosphériques majeures. Cependant, l'intensité que ces phénomènes peuvent atteindre à l'échelle locale peut être très différente de celle prévue, même si, normalement, la confiance de la prévision augmente à court terme, c'est-à-dire en se rapprochant du moment dont on veut prévoir les conditions météorologiques. La question de la réduction de l'incertitude dans les modèles de prévision de l'état de la mer, avec une référence particulière à l'impact des données de prévision sur la navigation, est également traitée dans le cadre du projet stratégique SICOMARplus. Normalement, l'incertitude des modèles de prévision de l'état de la mer peut être réduite grâce à diverses méthodologies concernant l'intégration entre les données observées et les modèles de prévision, telles que la calibration, la validation ou l'assimilation de données.

aspect/phénomène	description	notes

SST (température superficielle de la mer)	Les valeurs élevées de TSM, surtout à la fin de l'été et en automne, sont responsables de la libération de grandes quantités de chaleur latente (évaporation) dans l'atmosphère, qui peut contribuer au développement de précipitations particulièrement fortes et même d'ouragans méditerranéens.	En soi, la température de la mer ne présente pas de risque pour la navigation. Elle est détectée par l'imagerie satellitaire, les capteurs in situ et peut être prévue par des modèles de prévision océanique forcés ou éventuellement couplés à des modèles de prévision atmosphérique.
Cyclones méditerranéens	Les cyclones méditerranéens extratropicaux sont normalement des dépressions caractérisées par la présence d'un centre de basse pression (< 1000 hPa) et de vents particulièrement intenses. Dans certaines circonstances, ils peuvent évoluer vers des cyclones tropicaux méditerranéens (également appelés medicane ou MEDiterranean hurriCANE) caractérisés par un noyau chaud, une convection orageuse autour d'un centre des vents bien défini, des pluies torrentielles, des vents violents.	Normalement, les Medicane ne se développent pas dans la zone nord-ouest de la Méditerranée, entre l'Italie et la France, mais plus probablement dans le sud de la Méditerranée. Cependant, les vents forts qui caractérisent les cyclones extratropicaux méditerranéens peuvent également être très dangereux pour les grands navires.
Pluie	Le déclenchement de la pluie est dû à plusieurs mécanismes (collision de fronts chauds et froids, pluie convective, grands systèmes atmosphériques, soulèvement orographique)	La pluie peut être dangereuse car elle réduit la visibilité atmosphérique, cela dépend beaucoup de la taille des gouttes, ainsi la visibilité peut être réduite de 1500 m à 500 m
Nuages	Normalement associés aux conditions météorologiques, une forte concentration de nuages peut s'accompagner d'une grande instabilité atmosphérique susceptible d'affecter l'état de la mer et donc la navigation	Nuages cumulonimbus sont associés aux orages, aux fortes pluies et aux rafales de vent supérieures à 30 nœuds ; les cirrus préfrontal indiquent le rapprochement de mauvaises conditions météorologiques.

Brouillard	En mer, il s'agit normalement d'un brouillard d'advection, qui se développe lorsque la différence entre la température SST et la température du point de rosée est > 2°C et l'humidité > 95%.	Le brouillard est un gros risque pour la navigation, notamment à proximité des zones maritimes dangereuses (zones étroites, ports, détroits, etc.). Le brouillard dense est responsable d'environ 32% des accidents maritimes dans le monde.
Tempêtes	Il existe plusieurs types de tempêtes de mer, en fonction du système de circulation atmosphérique qui les génère.	Les situations de mer orageuse avec de hautes vagues sont très dangereuses pour la navigation. Normalement, les prévisions de vague sont parmi les plus fiables des services météorologiques.
Houle	Résiduelle des vagues qui se sont produites dans les zones voisines au cours des heures/jours précédents	Peut être dangereuse, surtout lorsqu'elle est associée à des mers croisées (crossing seas)
Trombes d'air et trombes d'eau	Il s'agit de phénomènes météorologiques très destructeurs, à haute densité d'énergie, caractérisés par de violents tourbillons d'air à l'échelle locale qui se produisent à la base d'un cumulonimbus et sont donc presque toujours associés à des orages extrêmement violents (supercellules).	Les trombes d'eau sont des phénomènes similaires aux trombes d'air, mais d'intensité en moyenne réduite. Ils naissent souvent d'orages de taille modeste, voire de nuages plus petits que les cumulonimbus. Leur apparition est due à une rotation de vent préexistante dont la combinaison avec un mouvement convectif génère la trombe d'eau. Dans certains cas, l'intensité du phénomène peut être considérable et la trombe est dite tornadique.
Courants marins	Ils ont plusieurs mécanismes de déclenchement (vent, marées, interaction avec le mouvement des vagues, courants de densité, etc.) et peuvent être associés même à des changements du niveau de la mer.	Typiquement, les courants marins ne sont pas dangereux pour la navigation, mais leur effet sur les navires peut être amplifié près des détroits et dans les zones maritimes restreintes et les ports, en particulier lorsque les navires réduisent leur vitesse.

L'un des objectifs de GIAS est de tenter de mieux comprendre des situations particulièrement difficiles à prévoir, dans lesquelles l'élément exposé au risque est le navire même, l'équipage, les passagers et les marchandises transportées.

Nous connaissons plusieurs types de conditions météorologiques et météo-marines qui rendent la navigation particulièrement dangereuse. En fait, de nombreux accidents en mer, depuis que l'homme a commencé à naviguer jusqu'à présent, se sont produits dans des conditions de mer agitée. Parfois, ce facteur est combiné à la nécessité de traverser certaines zones particulièrement dangereuses, par exemple les détroits (Gibraltar, Messine) ou dans les zones transfrontalières, le détroit de Bonifacio. Même la navigation côtière peut être dangereuse, notamment à l'approche de la côte ou des ports pendant des tempêtes de mer particulièrement intenses.

La prévision de phénomènes intenses tels que les vents et les tempêtes de mer est normalement effectuée par les centres météorologiques avec une bonne fiabilité dans la fourchette de 48 à 72 heures. Cependant, il existe des risques dont la prévisibilité est beaucoup plus complexe. Par exemple, il est assez difficile de prévoir la formation de brouillard en mer, qui se produit périodiquement dans la Méditerranée lorsqu'une masse d'air plus sèche et plus chaude passe au-dessus de la surface de la mer, plus froide et plus humide. L'apparition de ce phénomène, qui peut être très dangereux pour la navigation, échappe très souvent à la capacité de représentation des modèles utilisés en météorologie. D'autres exemples concernent la prédiction de phénomènes tels que les rafales de vent soudaines accompagnant le développement de cellules orageuses.

Il est également très difficile de prévoir les trombes marines, colonnes d'air tourbillonnant qui se forment au-dessus de la mer, très semblables aux tornades, et qui se développent surtout dans les mers chaudes. Ces phénomènes sont en augmentation dans la Méditerranée en raison du réchauffement climatique.

Un autre exemple est la prédiction du mouvement des vagues. Bien que cela soit normalement assez fiable, il peut se produire des situations en mer qui s'accompagnent du développement de vagues beaucoup plus hautes que celles que les modèles peuvent prévoir. Ces vagues sont souvent nommées dans la littérature internationale comme des vagues bizarres, “freak waves”, ou géantes, “giant waves” ou scélérates, “rogue waves”. En français elles sont nommées comme vagues scélérates, alors que en italien nous avons tendance à traduire ces noms par le terme de vagues anormales, “onde anomale”, car il s'agit en fait d'anomalies par rapport à certaines distributions traditionnelles, c'est-à-dire au concept de vague significative (Hs ou H1/3 ou Hm0), qui est très similaire à une sorte de vague moyenne "perçue" par qui navigue (peut-être mieux comme une vague équivalente d'un point de vue énergétique). Ces ondes ne peuvent être prédites de manière déterministe.

Qu’est-ce qu'ils ont en commun tous ces phénomènes difficiles à prévoir ? Précisément le fait que, comme il est très difficile de les prévoir à l'aide de modèles déterministes, cette prédiction ne peut pas être décrite en termes certains, mais il est bien préférable de raisonner en termes de probabilité.

En d'autres termes, il existe des situations caractéristiques dans lesquelles la probabilité que certains événements se produisent est accrue. Cette approche en météorologie est souvent abordée par une méthodologie basée sur les ingrédients, c'est-à-dire qu'il existe des situations dans lesquelles il y a tous les ingrédients qui peuvent favoriser avec une plus grande probabilité l'apparition de brouillard en mer, d'orages, de trombes marines, ou des vagues scélérates qui se produisent avec une plus grande probabilité lorsque les vagues ont certaines caractéristiques.

En général, l'approche probabiliste, qui décrit les phénomènes naturels même dans leur incertitude, est celle avec laquelle tout type de prévision doit être traité, mais cela est d'autant plus vrai dans ces cas où la prévisibilité est difficile.
S'habituer à raisonner en termes de probabilité, de risque accru, est l'une des choses auxquelles nous devons recourir chaque fois que la survenance d'un certain événement, même très dangereux et nuisible, est tout sauf certaine, et pourtant possible, surtout lorsque le dommage (en tant que combinaison de la valeur exposée et de la vulnérabilité) est très élevé, parce que l'enjeu est la perte de vies humaines ou les dommages causés à l'environnement par la perte de marchandises dangereuses en mer.

I. IDENTIFICATION DES RISQUES MÉTÉOROLOGIQUES DIFFICILES À PRÉVOIR POUR LE TRANSPORT MARITIME

Le projet fait la distinction entre les phénomènes strictement météorologiques (c'est-à-dire liés à la physique de l'atmosphère) et les phénomènes météomarins et océanographiques. Le travail de réflexion et d'analyse mené conjointement par LAMMA et ARPAL vise à élaborer une procédure commune de prévision des risques naturels difficiles à identifier.

A. Risques dus à des situations météorologiques difficiles à prévoir : orages, rafales de vent, trombes d'air.

Il existe plusieurs situations météorologiques, correspondant à des configurations différentes, qui sont potentiellement dangereuses pour la navigation dans la zone nord-ouest de la Méditerranée (golfe du Lion, golfe de Ligurie, mer Tyrrhénienne supérieure, mer de Corse). Ces situations ne sont pas nécessairement difficiles à prévoir mais, dans certains cas, elles sont prédites bien à l'avance (< 24-48 h) et avec une fiabilité raisonnable.

L'une des situations typiques de la région est la formation de basses pressions sur le golfe du Lion et la mer Ligure, qui sont normalement prévues par les modèles numériques. Le minimum sur le Golfe de Gênes peut être dû au déplacement du minimum du Golfe du Lion, et certains phénomènes associés, se produisant à des échelles spatio-temporelles plus détaillées, peuvent être plus difficiles à prévoir. En particulier :

- En cas de déplacement du minimum depuis le golfe du Lion vers le golfe de Ligurie, la rotation soudaine des vents vers Libeccio peut provoquer des amas de vent, souvent associés à des systèmes multicellulaires (ligne de grains);
- Si le vortex sur la mer Ligure se forme directement sur place, il y aura un renforcement progressif des vents d'ouest (Libeccio puis Ponente). Les rafales peuvent être très intenses

si la dépression est très profonde et peuvent devenir plus fortes en présence d'orages; les tempêtes de mer sont très probables.

- La présence d'un minimum profond sur la mer Ligure est associée à un mistral intense sur le golfe du Lion et la mer de Corse, mais le risque d'orages est faible en raison de l'entrée d'air froid et sec ; des tempêtes de mer sont probables;

Vous trouverez ci-dessous une analyse des différentes configurations caractéristiques de la zone, ainsi que le degré de prévisibilité exprimé sur une échelle de 0 (non prévisible) à 5 (prévisible):

Configuration	Description	Prévisibilité (1-5)
Formation d'une dépression sur le Golfe du Lion connecté à une poche atlantique.	Généralement, ce type de vortex, s'il est profond, entraîne un flux constant et intense de vents de sud (Sirocco/Marin) sur la mer Ligure et haute Tyrrhénienne. L'écoulement peut être associé, dans l'air chaud, à des systèmes orageux multicellulaires à la méso-échelle (voir définition dédiée). La mer est formée avec un long fetch et une période de vagues moyenne-longue.	5/5
Formation d'un minimum sur le Golfe de Ligurie.	Le vortex peut être le déplacement naturel vers l'est du minimum sur le Golfe du Lion, ou se former sur place par l'advection froide sur la France et l'advection chaude sur la Mer Tyrrhénienne (sous le vent des Alpes et des Apennins)	4/5

Formation d'une dépression sur le moyenne-basse mer Tyrrhénienne ou remontée d'un vortex depuis le centre-sud ou le sud-ouest de la Méditerranée.	Dans les deux cas, la zone nord-ouest de la Méditerranée est affectée par des vents intenses de type Tramontane et Grecale, caractérisés par une intensité particulièrement irrégulière. Les rafales associées à ces flux peuvent être très intenses et dangereuses. La mer au large de la côte peut être en tempête.	3/5
Cyclogenèse explosive	En cas d'advection froide, avec un fort gradient barométrique et thermique entre l'Europe centrale et la Méditerranée, le vortex peut prendre les caractéristiques d'une "cyclogenèse explosive", c'est-à-dire un système qui se creuse très rapidement (à un rythme d'au moins 1 hPa/heure). Dans ce cas, les rafales associées peuvent être extrêmement intenses et dangereuses. Généralement, ces vortex sont centrés sur le centre et le sud de l'Italie ou sur les mers Adriatique et Ionienne.	2/5
Orages d'été dans l'arrière-pays.	Pendant les mois d'été, en présence d'une convection intense, la formation de forts orages dans l'arrière-pays immédiat peut provoquer des rafales de vent soudaines de outflow et downburst (courants descendants très forts qui se distribuent radialement). Ces dernières, bien que limitées dans l'espace, peuvent constituer un danger pour la navigation dans les zones littorales.	1/5

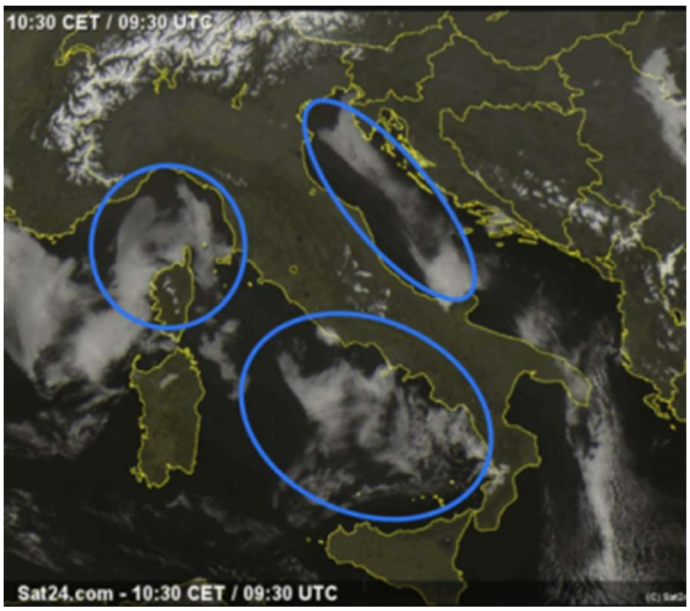
Concernant les systèmes orageux multicellulaires, il existe des phénoménologies associées qui comprennent:

- Les trombes marines: impossibles à prévoir dans l'espace, ils représentent une menace pour la navigation (surtout pour les petits navires), bien que leur portée soit souvent limitée. Ils se forment presque toujours en présence d'un front froid ou de lignes d'instabilité (air froid en altitude).
- MCC : très grands systèmes orageux qui se forment dans l'air chaud (flux de Sirocco, Marin). Elles peuvent être dangereuses en raison des précipitations intenses et des rafales soudaines;
- Ligne de grains : particulièrement dangereuse car elle est toujours associée à des vents frontaux intenses, coïncidant typiquement avec un front froid.

Brouillard d' "advection" ou de "glissement"

À la fin de l'hiver et au début du printemps, un brouillard persistant se forme souvent en mer. Ces phénomènes ne sont pas à considérer comme exceptionnels, mais ils sont certainement assez complexes à prévoir. En effet, entre la fin du mois de février et les dix premiers jours d'avril, la température de surface des mers Ligure, Adriatique et Tyrrhénienne atteint les minimums annuels. En présence de flux d'air plus chaude au-dessus de la surface, du brouillard et des nuages bas peuvent se former. Ce phénomène est presque toujours favorisé par la présence d'anticyclones subtropicaux associés à des flux de sud.

Lorsque de l'air plutôt sec et chaud, en l'occurrence d'origine nord-africaine, passe au-dessus d'une surface plus froide et plus humide comme la mer, il est contraint de s'élever au-dessus de la couche d'air située immédiatement au-dessus de l'eau. La surface de la mer influence thermiquement la partie inférieure de la colonne d'air qui, en présence d'une haute pression, est plus froide que l'air immédiatement au-dessus d'elle. Cela crée une couche d'inversion qui sépare une masse d'air plus froide et plus humide, la mer en dessous, d'une masse plus chaude et plus sèche, l'air au-dessus.



Le brouillard d'advection peut être très dangereux pour la navigation et les opérations portuaires, principalement parce qu'il peut survenir soudainement et avoir une distribution spatiale et une durée très irrégulières. Contrairement au brouillard de rayonnement, qui est surtout confiné aux heures de la nuit et du matin, le brouillard dérivant peut se produire à tout moment de la journée, surtout en haute mer.

Au niveau de la prévision, le phénomène est très difficile à prévoir en raison de la forte influence des conditions locales à micro-échelle, qui sont difficiles à paramétrer dans les modèles numériques qui simulent les variables atmosphériques. D'un point de vue climatologique, le phénomène se produit le plus fréquemment pendant les mois d'hiver (janvier et février) et la première partie du printemps (mars-avril), mais il peut être observé occasionnellement en mai, juin et décembre. Par contre, les nuages bas prédominent généralement pendant les mois d'automne. Il existe également des conditions favorables

au développement du brouillard d'advection: la présence d'un anticyclone subtropical caractérisé par des géopotentiels élevés et accompagné d'un flux de courants de sud très doux et secs à moyenne-basse altitude (925-850 hPa). Au sol (1000 hPa), il n'y a généralement pas de vent ou une faible ventilation variable et des valeurs d'humidité relative élevées. Comme mentionné ci-dessus, ces conditions doivent se produire à certaines périodes de l'année, c'est-à-dire lorsque les températures de surface de la mer sont au plus bas. En général, la dissolution du brouillard se produit avec la rupture de l'inversion thermique qui suit l'interruption du flux d'air chaud de surface. Cet événement correspond à l'affaiblissement des hautes pressions et à une augmentation de la turbulence (la couche limite a tendance à s'élever en altitude).

Évidemment, l'observation de ces paramètres ne garantit pas toujours une prévision correcte, car elle dépend beaucoup des conditions locales (micro-échelle). Cependant, sur un plan probabiliste, la présence des paramètres signalés augmente de manière significative la possibilité que le phénomène se produise. Les mêmes limitations qui déterminent la difficulté de la prévision numérique pour les variables météorologiques dites "terrestres" (par exemple, la température à 2 mètres et le vent à 10 mètres au-dessus du sol) sont amplifiées dans le cas de la prévision du brouillard marin.

De nombreux facteurs interviennent dans la prévision du brouillard marin, notamment: les conditions synoptiques, les inversions thermiques, la subsidence des masses d'air relativement plus froides et plus humides dans la basse atmosphère, les circulations locales dues à l'orographie côtière, la turbulence, les aérosols et les flux radiatifs à ondes longues et courtes.

Ces phénomènes sont le plus souvent paramétrés dans des modèles opérationnels de prévision météorologique à aire limitée, qui, bien qu'utilisant des résolutions proches du kilomètre, introduisent des approximations dans les interactions mer/atmosphère, approximations d'autant plus grandes dans les modèles "découplés", où le modèle de mer ne fournit pas de rétroaction au modèle atmosphérique et vice versa. Ces difficultés de prévision sont compliquées par le manque d' observations précises de la visibilité, qui sont cruciales pour une estimation optimale des conditions initiales.

Image envoyée par Cooperativa Dafne - événement du 1er avril 2021

B. Risques dus à des actions maritimes difficiles à prévoir

Courants intenses

Dans la Méditerranée, les courants marins, à de rares exceptions près et des situations qui sont presque absentes dans la zone nord-ouest de la Méditerranée, sont plutôt faibles (normalement moins de 20-30 cm/s en haute mer). Des situations particulières peuvent concerner les courants marins dans les eaux peu profondes et les zones restreintes. En particulier à l'approche des zones portuaires, lorsque la vitesse des bateaux est faible et que les courants de marée interagissent de manière significative avec le vent et les courants de densité, ou en présence de mer agitée lorsque le courant marin de surface est fortement influencé par les vagues elles-mêmes. Ces situations (navigation dans les zones portuaires) sont traitées, en particulier, par le projet SINAPSi financé, comme GIAS, dans le cadre du programme maritime Italie-France.

Vagues scélérates

Typiquement, les services de prévisions météorologiques maritimes fournis par les centres météorologiques produisent des cartes de hauteur significative des vagues représentant "la moyenne du tiers des vagues le plus élevé" ou $H_{1/3}$, c'est-à-dire une sorte de vague moyenne au niveau de l'énergie (parfois appelée H_{m0}), qui est certainement un paramètre d'une importance fondamentale pour la navigation, tant pour les petits que pour les grands navires. Toutefois, dans la réalité, il est possible de rencontrer des vagues beaucoup plus élevées, bien qu'avec une faible probabilité. La distribution des

vagues la plus couramment utilisée est la distribution de Rayleigh (dérivée des hypothèses de linéarité du mouvement des vagues et de gaussianité de la surface libre), dans laquelle la hauteur de vague maximale correspondante H_{max} varie normalement dans une fourchette d'environ 1,6 à 1,8 fois la hauteur de vague significative. Dans la littérature scientifique, on a tendance à utiliser comme seuil pour identifier les vagues "scélérates" les vagues dont la hauteur est supérieure à 2 fois Hs. Ce que font la plupart des modèles utilisés traditionnellement est d'utiliser des distributions de probabilité "standard" dérivées théoriquement. Toutefois, selon les conditions de la mer, on peut obtenir des distributions différentes et, par conséquent, pour des mers ayant la même hauteur significative, la probabilité de rencontrer des vagues scélérates peut être très différente. Par conséquent, des conditions apparemment similaires peuvent en réalité être associées à des niveaux de risque très différents.

Ces vagues plus extrêmes dans une distribution, d'un point de vue physique, peuvent se former pour diverses raisons. Le plus souvent, elles sont générées par superposition linéaire, c'est-à-dire que des vagues provenant de différentes directions sont concentrées en un même point de l'espace au même moment, générant une seule vague de plus grande hauteur, ou cette superposition peut être causée par des vagues de différentes longueurs d'onde et donc des vagues à différentes vitesses qui se "doublent". De tels mécanismes sont pris en compte par les modèles traditionnels avec lesquels il est possible d'avoir une première approximation de la fréquence des ondes anormales, ou au-delà d'un certain seuil. Cependant, il existe des mécanismes plus complexes et aussi beaucoup plus difficiles à prendre en compte dans un modèle. Par exemple, les vagues interagissent avec le milieu environnant, comme la bathymétrie (c'est-à-dire la profondeur et la morphologie des fonds marins), les courants marins et le vent, ce qui peut entraîner la concentration des vagues en un même point et donc augmenter leur hauteur. Enfin, les vagues interagissent entre elles de manière non linéaire et complexe, et ces interactions peuvent à leur tour générer des vagues d'une hauteur inattendue.

La prévisibilité de ces phénomènes est très faible, car ils ne peuvent être traités que de manière probabiliste. Les outils utilisés dans GIAS pour étudier ces phénomènes et quantifier leurs probabilités seront présentés dans le chapitre sur la modélisation.

II. OBSERVATIONS

Voici un aperçu des principaux outils d'observation disponibles pour l'observation météorologique et marine des phénomènes décrits dans le chapitre précédent.

L'une des phases les plus critiques de la navigation est l'approche, l'entrée et la sortie des zones portuaires. Les bassins portuaires représentent un danger pour les navires, notamment les grands, engagés dans des manœuvres d'approche et d'amarrage/désamarrage au quai. Ces opérations sont rendues encore plus critiques en présence de phénomènes météorologiques intenses qui réduisent la visibilité et la manœuvrabilité des navires. D'un point de vue météorologique, il convient d'accorder une attention particulière au brouillard dense et aux rafales de vent soudaines, parfois liées à des phénomènes atmosphériques difficiles à prévoir. Cependant, bien que ces événements ne soient pas toujours faciles à prévoir correctement, un soutien important sur terre peut être fourni par les stations météorologiques, qui peuvent non seulement mesurer avec une grande précision les phénomènes en cours mais aussi aider les météorologues dans les prévisions à très court terme (nowcasting).

Les données des capteurs décrits ci-dessous sont présentes dans la zone correspondant à l'espace de coopération, mais dans une large mesure, et surtout pour certains paramètres cruciaux (vent, visibilité), la densité de ces données est extrêmement faible. Des stations météorologiques complètes seront installées au sein de GIAS.

A. Observations météorologiques à partir de stations au sol

Les stations météorologiques au sol fournissent une image complète de l'évolution atmosphérique en cours, en détectant divers paramètres environnementaux, tels que la température, la vitesse du vent, l'humidité ou la pression atmosphérique, pour n'en citer que quelques-uns; ces capteurs, convenablement interfacés avec un système d'acquisition (datalogger) sont en mesure de traiter les données recueillies et de les transmettre à distance.

Si elles sont correctement conçues, les stations météorologiques peuvent fonctionner dans n'importe quel type d'environnement.

Les principaux facteurs à prendre en compte lors de la conception à proximité des ports et des zones maritimes sont les suivants :

- Capacité à fonctionner en l'absence d'alimentation électrique.

Il est souvent nécessaire de prévoir un système d'alimentation autonome qui, dans ce cas, est basé sur l'utilisation de panneaux photovoltaïques, flanqués d'un régulateur de charge et d'un bloc de batteries de capacité appropriée. L'énergie électrique disponible est toutefois limitée et, par conséquent, outre le

choix de capteurs à faible consommation, il est également nécessaire d'ajuster soigneusement les intervalles d'acquisition des données.

- Résistance aux infiltrations et à l'exposition aux agents corrosifs

L'environnement marin étant particulièrement hostile, il est nécessaire de choisir un système qui soit non seulement totalement étanche mais aussi capable de résister à la corrosion, et ce non seulement pour les capteurs mais aussi pour les boîtes, les tuyaux de support, les câbles, les vis et tout ce qui est exposé à l'extérieur.

- Manque de connexion de données

La transmission des données doit généralement se faire via un réseau de téléphonie mobile (3G-4G) éventuellement intégré à l'enregistreur de données.

- Environnement difficilement accessible

Ces zones étant souvent d'accès difficile (plateformes, quais inaccessibles, etc.), la maintenance doit être réduite au minimum et les contrôles éventuels du système doivent être effectués à distance. L'ensemble du système d'alimentation doit être soigneusement dimensionné et il faut choisir des capteurs qui ne comportent pas de pièces mobiles et qui sont donc moins sujets aux pannes et aux dysfonctionnements. L'architecture du système doit également être simplifiée au maximum. L'utilisation de protocoles de communication numériques permet de connecter de nombreux capteurs, ce qui minimise le nombre d'opérations à effectuer lors de l'installation et accélère les réparations éventuelles en cas de dommages.

Bien que les phénomènes de brouillard soudain et de rafales de vent constituent le plus grand danger pour les navires et que cette information doit être transmise en temps quasi réel à tous les opérateurs maritimes (par exemple, les pilotes, les skippers, les amarrageurs), une prévision immédiate correcte est basée sur l'observation de multiples paramètres météorologiques qui doivent être détectés simultanément.
Vous trouverez ci-dessous une liste des paramètres et des capteurs météo associés dont devrait être équipée une station météorologique terrestre conçue pour fonctionner dans ce contexte.

Température. Pour une mesure de température fiable et précise, il y a de nombreuses astuces à considérer pour obtenir une mesure fiable et la plus proche possible de la réalité. Par exemple la mesure peut être influencée par la température du support sur lequel le capteur est fixé, par la lumière directe du soleil, ou même par l'auto-échauffement de l'équipement lui-même. Le capteur installé dans ce cas est basé sur un capteur NTC (norme DIN 34760 pour la classification de ces capteurs en fonction de leur classe de précision) inséré dans un support spécial qui le protège à la fois de la pluie et des radiations, en même temps que des mesures appropriées permettent la recirculation de l'air à l'intérieur pour obtenir la lecture la plus précise possible.
Le capteur a une précision de ±0,2° et une résolution de 0,01°.

Humidité relative. Un capteur capacitif est utilisé pour mesurer l'humidité. Il utilise les propriétés hygroscopiques d'un polymère spécial pour détecter les changements d'humidité de l'environnement dans lequel il se trouve.
Dans des conditions normales, ce capteur a une précision d'environ 2% à une température de 20°.
Une mesure indirecte obtenue à partir des paramètres de température et d'humidité est le point de rosée (dew point). Typiquement, la température du point de rosée est indicative du niveau de saturation de l'air et peut, dans certaines conditions atmosphériques, être associée à la formation de brouillard et de nuages bas.

La pression atmosphérique. Elle est mesurée par un dispositif MEMS qui mesure le poids de la colonne d'air au-dessus du capteur à un moment donné. Cette valeur est influencée par la température et les conditions atmosphériques locales ainsi que par l'altitude. Les capteurs doivent être capables de mesurer des intervalles de pression compris entre 850 et 1050 hPa avec une précision de ±0,5 hPa.

Capteur de rayonnement solaire. capable de mesurer l'intensité du rayonnement solaire total incident sur le capteur grâce à un élément semi-conducteur sensible à certaines longueurs d'onde et grâce à l'électronique de traitement embarquée sur le capteur de renvoyer une valeur en W/m2 . Étant donné que le paramètre à mesurer dépend fortement de l'exposition du capteur, il est évident que, lors de l'installation, il convient d'éviter soigneusement toutes les positions susceptibles de projeter des ombres ou d'être une source de réflexions sur le capteur, et il est tout aussi important de veiller à ce que la fenêtre du capteur soit dans un état qui ne soit pas sale ou obstrué.

Visibilimètre. La visibilité est la distance maximale à laquelle un objet placé près du sol peut être vu. Elle dépend de l'observateur, mais surtout des conditions environnementales telles que les particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère et leur capacité à absorber ou à diffuser la lumière.

Le visibilimètre est un instrument capable de mesurer ce paramètre et d'indiquer dans quelle mesure la visibilité est réduite à cause du brouillard, de la pluie, de la fumée ou d'autres événements atmosphériques.
L'utilité de ce paramètre a des implications évidentes dans tous les endroits où, pour des raisons de sécurité, il est nécessaire d'effectuer des manœuvres ou de garder le contrôle des véhicules en mouvement. Comme il s'agit d'un système optique particulièrement délicat, il peut être nécessaire, dans certaines conditions, d'activer un système anti-condensation pour chauffer l'ensemble de lentilles et d'autres systèmes afin d'empêcher les insectes, l'eau et les débris d'entraver son fonctionnement.
La visibilité météorologique (MOR) est exprimée en mètres ou en kilomètres (OMM-No.8, chapitre 9).
Dans notre cas, le capteur est capable de définir la visibilité dans un rayon compris entre 10 et 2000 mètres. Des techniques alternatives pour la mesure de la visibilité sont basées sur l'analyse d'images provenant de caméras fixes (Wauben et al. 2016).

Anémomètre sonique. Un instrument appelé anémomètre est utilisé pour caractériser le vent. Il est possible de trouver différents types de ces instruments, mais dans notre cas, le choix d'un anémomètre

sans pièces mobiles est obligatoire ; le fait de disposer d'un instrument totalement statique le rend plus robuste, plus précis et adapté à des environnements difficiles d'accès.

La vitesse du vent est mesurée à l'aide de 4 transducteurs ultrasoniques dans un seul instrument compact, avec leur électronique pour le traitement des mesures recueillies.

Le vent peut être une quantité très complexe à caractériser, mais les mesures qu'un anémomètre doit généralement fournir sont la vitesse et la direction moyennes dans le plan horizontal. Dans de nombreux cas, il est également nécessaire de caractériser la variation de la vitesse du vent dans le temps et les valeurs maximales qu'elle atteint; un paramètre appelé rafale (wind gust) tient compte de cette variabilité. Le choix du lieu et de la position d'installation d'un anémomètre est fondamental car la hauteur au-dessus du sol et la présence d'obstacles peuvent fortement modifier toutes les mesures d'intérêt vues précédemment. Certaines spécifications et recommandations minimales concernant l'installation et les fréquences d'acquisition des données sont fournies par le WMO. En particulier pour les mesures de rafales, il est recommandé d'échantillonner le signal de vent filtré toutes les 0,25 s (fréquence 4 Hz). Des taux d'échantillonnage plus faibles peuvent être utilisés, mais il faut savoir que l'estimation de la valeur extrême sera généralement plus faible (WMO-No.8, chapitre 5).

Enregistreur de données

Dans certains cas, la communication est analogique, dans d'autres elle est numérique, comme le SDI-12, un protocole dédié à la transmission de données avec une très faible consommation d'énergie, et le RS485, un autre système de communication de données très efficace et résistant aux interférences.

Certains capteurs tels que la température, l'humidité et la pression sont généralement des capteurs intégrés, ce qui rend le système plus compact.

BIBLIOGRAPHIE

World Meteorological Organization. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8, CIMO Guide). Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization. Chapter 5, 9, pp. 315-336.

Wauben, Wiel, and Martin Roth. (2016) “Exploration of fog detection and visibility estimation from camera images”, WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, CIMO TECO 2016, Madrid, Spain, 1-14.

B. Observations météorologiques par satellite

La contribution des observations à distance à la question de la sécurité de la navigation inclut la possibilité de surveiller une série de phénomènes météorologiques dans des zones où les capteurs in situ ne sont pas disponibles. En particulier, l'atténuation des effets du brouillard marin peut être facilitée par la détection au moyen d'observations par satellite. Malheureusement, les approches traditionnelles

(capteurs passifs) ont montré des difficultés objectives à détecter le brouillard à distance, et à présent, cette activité représente toujours un défi ouvert pour la recherche.

Les principales difficultés de la détection du brouillard à partir de capteurs satellitaires passifs peuvent être résumées en trois problèmes spécifiques :

1. séparer les pixels nuageux des pixels de ciel clair
2. séparer les nuages bas des nuages élevés
3. séparer le brouillard des nuages bas

Le premier problème, qui consiste à séparer les nuages du ciel clair, est plus facile à résoudre de jour que de nuit en raison des différences de réflectance dans les bandes visibles. Comme la réflectance de la surface de l'océan est très faible, la plupart des types de nuages ressortent sur les images satellitaires avec une brillance caractéristique.
Bendix, Thies, Nauss et Cermak (2006) fournissent quelques contraintes sur la gamme attendue d'épaisseur optique et d'albédo pour le brouillard. Toutefois, comme la plupart des nuages sont très brillants, il est presque impossible, dans la plupart des cas, de distinguer objectivement les nuages élevés des nuages bas sur la seule base de la réflectance dans la partie visible du spectre.
Le brouillard et les nuages bas sont souvent détectés en évaluant la différence entre la température de brillance à bande étroite observée dans la fenêtre infrarouge à ondes longues du spectre (typiquement une longueur d'onde comprise entre 10 et 12 µm) et la température de brillance observée dans l'infrarouge à ondes moyennes (typiquement dans la gamme de 3 à 4 µm). Pour les nuages bas et le brouillard, l'émissivité dans le canal fenêtre infrarouge à ondes longues est supérieure à l'émissivité infrarouge à ondes moyennes, ce qui entraîne une valeur négative pour la différence (canal infrarouge à ondes moyennes moins canal fenêtre à ondes longues) des valeurs observées des températures de brillance, et cette différence augmente avec l'épaisseur des nuages (Ellrod, 1995).
Les nuages bas et le brouillard peuvent être davantage distingués des nuages élevés à l'aide d'une mesure de la température du sol. Les nuages bas tels que le brouillard ont des températures de sommet qui sont rarement inférieures d'environ 10° K à la température du sol. La température au sommet du nuage peut être déduite de la température de brillance du canal infrarouge de la fenêtre, de sorte qu'une grande différence entre cette température et celle du sol indique un nuage élevé.
La distinction entre le brouillard et les autres types de nuages bas reste l'un des principaux défis de la détection à distance du brouillard. La plupart des types de nuages apparaissent clairs sur les images visibles et les nuages bas ont un sommet "chaud" avec des températures relativement proches de la température de surface. Aucun capteur satellitaire passif ne reçoit d'informations sur l'altitude de la base des nuages. En l'absence de données d'échantillonnage détaillées, comme c'est généralement le cas pour les événements de brouillard marin, il est difficile de distinguer un brouillard dont la base se trouve à la surface de la mer ou au-dessus de celle-ci, d'une couche normale de nuages bas dont la base est plus élevée que la surface de la mer.
Zhang et Yi (2013) utilisent une climatologie de la température de surface de la mer pour distinguer le brouillard des nuages bas au-dessus des mers adjacentes à la Chine. Ce travail rapporte une différence entre la température du sommet de la couche de brouillard et la surface de la mer diffère entre les cas de brouillard et de nuages de basse couche. Par conséquent, la moyenne mensuelle de la climatologie

SST est utilisée pour déterminer un seuil dynamique sur la température de brillance infrarouge utile pour la détection du brouillard.
Dans Wilcox (2017), des observations conjointes des signatures spectrales des nuages dans le visible et l'infrarouge sont utilisées avec des acquisitions de la température de surface de la mer (SST) basées sur des données satellitaires provenant de capteurs micro-ondes. Ce travail démontre comment d'autres approches (Gultepe et al., 2007, Bendix et al. 2006 et Zhang et Yi, 2013) utilisant différentes mesures de température de surface pour améliorer la détection du brouillard peuvent être reproduites et améliorées en utilisant uniquement des données satellitaires. Les avantages de cette technique sont les suivants :

(a) elle est basée uniquement sur des données satellitaires localisées.
(b) elle peut être appliquée soit dans les zones côtières soit dans les zones de haute mer où les stations ne disposent pratiquement pas de données d'échantillonnage ou de température.
(c) il n'est pas basé sur une simulation numérique du modèle météorologique traité par ordinateur.
(d) le brouillard lui-même est transparent au rayonnement micro-onde utilisé pour la récupération de la TSM tant qu'il ne pleut pas.

D'autres études, (par exemple Wang et al.2019) se concentrent sur la détection du brouillard à des moments spécifiques de forte occurrence du phénomène (aube et crépuscule). Grâce à l'analyse des caractéristiques spectrales du brouillard marin à l'aube et au crépuscule, cette étude détermine la loi de variation de la réflectivité et de la température de brillance du brouillard marin à l'aube et au crépuscule, choisit les bandes de sensibilité, fixe l'indice de détection du brouillard marin et son seuil dynamique, et met en œuvre la détection du brouillard marin à l'aube et au crépuscule.

Des approches plus récentes basées sur la détection active (comme dans Cermak, 2018) montrent comment des outils tels que le LiDAR peuvent permettre de cartographier la distribution et les caractéristiques des brouillards/nuages bas, comme les changements d'épaisseur des couches, ce qui est impossible à détecter avec des capteurs passifs.
D'autres travaux (par exemple, David, 2018) démontrent le potentiel des réseaux de communication par micro-ondes pour la détection du brouillard dans des conditions difficiles où les systèmes satellitaires sont souvent limités. D'une part, la capacité de détecter le brouillard à l'aide des connexions micro-ondes commerciales est soulignée, à un moment où le satellite ne peut pas détecter le brouillard en raison d'une couverture nuageuse élevée qui masque le brouillard au niveau du sol. D'autre part, la capacité du système micro-ondes à exclure la présence de brouillard au niveau du sol lorsque le satellite détecte un nuage en couche basse, mais n'est pas en mesure de l'identifier comme adjacent au sol ou à des altitudes plus élevées au-dessus de celui-ci, est mise en évidence. Ces approches montrent un potentiel opérationnel considérable de ces techniques et sont susceptibles d'être développées dans l'avenir.

C. Autres observations

Radar météo

Le radar est un instrument de haute technologie qui permet de localiser et d'estimer les précipitations sur une large zone circulaire entourant le système radar et de détecter la structure tridimensionnelle des phénomènes météorologiques en mesurant la réflectivité des hydrométéores (pluie, neige, glace) dans l'atmosphère. Son utilisation opérationnelle est particulièrement utile dans la prévision immédiate (nowcasting), notamment en ce qui concerne la détection des phénomènes violents (orages, grêle, cisaillement du vent). Son principal avantage est la possibilité d'acquérir des données en trois dimensions pour de grandes zones.

La conformation de la côte ligure-toscane, sa position par rapport à la mer Méditerranée et la morphologie de l'arrière-pays rendent cette portion de côte particulièrement exposée à des phénomènes météorologiques intenses et violents.
Des activités spécifiques concernant l'utilisation des radars météorologiques pour la sécurité de la navigation sont prévues dans le cadre du projet SICOMAplus.

Radars marins

Les radars côtiers, dans différentes bandes (bande X, HF, VHF, etc.) sont de plus en plus utilisés pour surveiller l'état de la mer.
Le principe est que les ondes électromagnétiques émises par une (ou plusieurs) antenne(s) émettrice(s) sont réfléchies par la surface de la mer puis détectées par une (ou plusieurs) antenne(s) réceptrice(s). La réponse de la mer est mesurée et interprétée en fonction de la connaissance des propriétés des vagues et des courants marins qui provoquent un "retard" dans la réponse, connu sous le nom d'effet Doppler.
Dans la bande X, les ondes électromagnétiques ont la même longueur d'onde que les ondes capillaires, et le principal signal d'intérêt est lié au mouvement des ondes. En deuxième approximation, il est possible de travailler sur la détection du courant marin de surface. La portée de ces radars est de 1 à 4 km.
Dans la bande HF, les ondes électromagnétiques ont des longueurs beaucoup plus importantes (jusqu'à plusieurs mètres), et le principal signal d'intérêt (la partie la plus énergétique du spectre de réponse) est lié aux courants marins mesurés dans leur composante radiale). La portée de ces radars dépend des fréquences radar, à 13,5 MHz par exemple, la portée peut atteindre 70-80 km et la résolution typique des courants mesurés est de 1,5-2 km.
L'activité radar marin (tant en termes d'investissements réalisés dans le domaine de l'espace de coopération que de produits) est développée dans le cadre du projet SICOMARplus.

III. MODÈLES

A. Modèles météorologiques

L'évolution spatiale et temporelle de la vitesse, de la température et de l'humidité des masses d'air détermine le temps atmosphérique, qui est généralement notifié par les prévisions météorologiques. L'ensemble des équations décrivant les transformations atmosphériques se compose de l'équation de conservation de la masse, de l'équation de conservation de la quantité de mouvement et de l'équation de conservation de l'énergie.
Les équations décrivent l'évolution temporelle et spatiale de diverses quantités ou variables qui, si elles sont présentes sous la forme d'une dérivée temporelle, sont dites pronostiques, sinon diagnostiques.

Les centres météorologiques (tels que LAMMA et ARPAL) exécutent des modèles météorologiques utilisant des codes tels que WRF, BOLAM et MOLOCH. Les chaînes de prévision adoptées par LAMMA et ARPAL ont été validées.

B. Modèles des vagues moyennés en phase

La génération et la propagation des ondes, à des échelles spatiales et temporelles dont les ordres de grandeur sont supérieurs à 1-2 km ou 12-24 heures, respectivement, sont généralement décrites par des modèles moyennés en phase. Dans ces modèles, l'équation d'évolution est une équation d'équilibre pour l'action des vagues N, définie comme le rapport entre l'énergie spectrale E et la fréquence relative σ, qui est liée à la fréquence absolue ω par la dépendance du vecteur nombre d'onde k et du vecteur U représentant la vitesse du courant (si présent). Contrairement à l'énergie, l'action des vagues est conservée en présence de courants.
Les différents termes représentent la variation temporelle, la propagation spatiale (x,y) et la propagation intra-spectrale (k, thêta). Les termes à droite des égaux sont les termes dits sources qui prennent en compte l'interaction vague-vent et donc la génération, les interactions non linéaires entre les vagues qui transfèrent l'énergie entre les différentes parties du spectre et les phénomènes de dissipation dus au whitecapping ou à la friction au fond.
Plusieurs schémas numériques sont disponibles pour résoudre l'équation de conservation de l'action des vagues et, récemment, plusieurs efforts ont été déployés pour améliorer la représentation des termes sources.

Les centres météorologiques (tels que LAMMA et ARPAL) exécutent des modèles de mouvement des vagues en utilisant des codes tels que WW3, SWAN et MIKE-SW. Les chaînes de prévision adoptées par LAMMA et ARPAL ont été validées.

C. Modèles des vagues non moyennées en phase

Les modèles des vagues sans moyenne en phase sont définis comme une représentation du phénomène qui est capable de décrire son évolution vague par vague. Ces modèles sont généralement dédiés à l'environnement côtier où les phénomènes de diffraction, réfraction, shoaling et déferlement et réflexion sont reproduits par le modèle.
Ces modèles sont principalement utilisés pour des études de processus ou des études liées, par exemple, à l'impact des vagues de tempête sur la côte.
LAMMA et ARPAL utilisent des codes tels que MIKE 21 BW et X-Beach.

D. Modèles hydrodynamiques

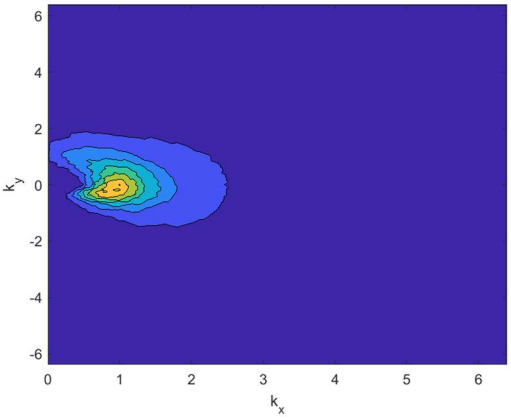
Les modèles hydrodynamiques dans l'environnement marin sont également basés sur les équations du bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. En général, compte tenu des caractéristiques de l'environnement étudié, on peut faire des hypothèses qui simplifient considérablement les équations.
L'approximation de Boussinesq, selon laquelle les variations de densité sont faibles par rapport à la valeur absolue de la densité du fluide, permet de négliger les effets de ces variations sur tous les termes des équations de continuité et de mouvement, à l'exception du terme où la densité multiplie l'accélération gravitationnelle. En d'autres termes, le fluide peut être considéré comme incompressible.
L'approximation hydrostatique, en revanche, permet de négliger les accélérations verticales par rapport à l'accélération de la gravité et contribue à simplifier l'équation de conservation de la quantité de mouvement le long de l'axe vertical. Afin d'éviter de devoir résoudre l'ensemble des équations jusqu'aux plus petites échelles de mouvement, les variables sont divisées en une composante associée au mouvement moyen et une partie fluctuante (turbulente). Cette procédure, étant donné la non-linéarité des équations de départ, conduit à la dérivation de termes supplémentaires appelés "contraintes de Reynolds", qui décrivent la diffusion de la quantité de mouvement dans le fluide. Ces termes sont déterminés au moyen de "modèles de fermeture" appropriés qui permettent de calculer les valeurs des coefficients de diffusion turbulente (A, νE, kE).
Grâce à ces approximations, on obtient l'ensemble suivant d'équations aux dérivées partielles, appelées "primitives", dans lesquelles les variables pronostiques sont les vitesses u, v, la température T et la salinité S. Les quantités de densité ρ, de vitesse verticale w et d'élévation de surface libre η sont appelées variables de diagnostic et sont dérivées d'équations supplémentaires.
Dans certaines situations, lorsque l'échelle du mouvement dans la direction horizontale est beaucoup plus grande que celle dans la direction verticale, cette dernière peut être négligée jusqu'à obtenir l'approximation "eau peu profonde". Cette approximation supprime un degré de liberté du système en éliminant la variable w, de sorte que les vitesses horizontales u et v sont moyennées sur la verticale. En outre, l'équation de continuité est modifiée pour relier directement la divergence de la quantité de mouvement (comprise comme uh où h est la hauteur de la colonne de fluide) à la variation de la surface libre de l'eau.

L'ensemble des équations est résolu par des algorithmes numériques de différents types, qui varient également en fonction de la relaxation de certaines des approximations mentionnées précédemment. Dans des conditions particulières, certaines des approximations peuvent être supprimées, ce qui donne lieu à des équations non hydrostatiques. Le degré de représentativité plus élevé est toutefois diminué par une plus grande complexité des algorithmes numériques pour les résoudre et un temps de calcul plus long.
Les centres météorologiques (tels que LAMMA et ARPAL) exécutent des modèles océanographiques de zone limitée en utilisant des codes tels que ROMS, MIKE-3, MITgcm. Les chaînes de prévision adoptées par LAMMA et ARPAL ont été validées.

E. Modèles et indices pour évaluer la probabilité des vagues extremes

Afin d'obtenir des estimations probabilistes de la présence de vagues extrêmes ou scélérates, du point de vue de la modélisation, plusieurs méthodes peuvent être adoptées qui peuvent fournir des informations localement plus détaillées que les modèles de vagues à grande et petite échelle forcés par les modèles atmosphériques (WAM, WWIII, SWAN). Grâce à cette dernière, il est possible d'identifier les criticités potentielles en surveillant les principaux observables tels que la hauteur significative des vagues, la période de pointe et la directionnalité, puis d'effectuer une analyse locale détaillée.
Une méthode rapide qui peut être facilement couplée aux modèles des vagues est l'utilisation d'indices et d'indicateurs, tels que l'indice de Benjamin-Feir (BFI) (P.A.E.M. Jansen, 2002), donné par le rapport entre la pente de l'onde et la largeur de bande spectrale, pondérant ainsi la non-linéarité contre la dispersion. Des valeurs élevées du BFI, proches de l'unité ou supérieures à celle-ci, indiquent une probabilité plus élevée de vagues extrêmes liées au mécanisme de formation de l'instabilité de Benjamin-Feir (ou instabilité modulatoire).
Des variantes du BFI ont également été proposées, comme le BFI effectif (Waseda et al. 2008), qui l'étend en tenant également compte de la directionnalité du spectre.
Le calcul du BFI appliqué à des spectres réels nécessite l'estimation de plusieurs paramètres tels que la largeur de bande spectrale et la fréquence de pic et peut donc conduire à des résultats différents selon la méthode de calcul utilisée, mais il reste un outil utile comme indicateur prédictif.
Des observables statistiques tels que l'asymétrie, ou skewness, et l'aplatissement, ou kurtosis, de l'élévation de la surface peuvent également être utilisés comme indicateurs, indiquant l'écart par rapport à une distribution gaussienne, qui caractérise les modèles linéaires. En particulier, le kurtosis évalue le poids des queues statistiques et fournit ainsi des informations sur la probabilité des événements les plus éloignés de la moyenne. Afin de calculer ces indicateurs statistiques, il est nécessaire de résoudre complètement la forme d'onde par des simulations directes, et les informations spectrales seules ne sont pas suffisantes.
Les modèles de simulation directe non linéaire des vagues constituent la méthode la plus appropriée pour étudier les vagues extrêmes, même si, en raison de leur coût élevé en termes de ressources informatiques, ils ne peuvent être utilisés que comme un outil pour une analyse plus fine au niveau local.

Ces modèles sont basés sur l'hypothèse d'un écoulement potentiel, négligeant ainsi la viscosité et la rotation du fluide, et consistent à résoudre l'équation de Laplace pour le potentiel à l'intérieur du domaine, accompagnée de deux conditions aux limites non linéaires pour la surface libre, l'une dynamique (continuité de la pression) et l'autre cinématique (écoulement nul à travers la surface). Plusieurs méthodes ont été développées pour résoudre ce système d'équations, notamment la méthode des éléments limites (BEM), qui reformule l'équation de Laplace aux limites, et la méthode spectrale d'ordre élevé (HOS) proposée en 1987 séparément par West et al. et Dommermuth et Yue. La méthode HOS permet de simuler l'évolution non linéaire des ondes de gravité dans des domaines périodiques, en utilisant une formulation spectrale basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT), qui garantit une grande efficacité de calcul.
Dans ces modèles à résolution directe, il n'y a généralement pas de forçages externes tels que le vent ou les courants, mais seul le champ de potentiel est avancé dans le temps à partir d'une condition initiale donnée, réelle ou paramétrée. Cependant, il faut également mentionner la présence dans la littérature scientifique de modèles à résolution directe avec l'ajout du forçage du vent (Kharif et al. 2007) et de la dissipation due au déferlement des vagues (Xiao et al. 2013).
Le Consortium LaMMA utilise la méthode HOS mise en œuvre dans le code open-source HOS-ocean (https://github.com/LHEEA/HOS-ocean) développé à l'Ecole Centrale de Nantes. Dans HOS-ocean, la simulation peut être initialisée en utilisant une forme d'onde régulière ou un état de mer irrégulier généré à partir d'un spectre paramétrique directionnel JONSWAP ou d'un spectre sortant de l'outil WWIII, avec les phases générées aléatoirement. Parmi les paramètres numériques, en plus du nombre de modes spectraux (correspondant à la résolution de la grille cartésienne), il faut spécifier l'ordre de non-linéarité avec lequel le potentiel doit être approximé, calculé de manière itérative.
Parmi les paramètres physiques, la taille du domaine, la profondeur (constante finie ou infinie), la période de pointe et la hauteur significative des vagues, ainsi que d'autres constantes possibles pour le paramétrage du spectre, doivent être spécifiées.
Avec cette méthode, l'objectif est d'évaluer la présence des vagues extrêmes générées naturellement par des interactions non linéaires en propageant des réalisations du système d'ondes sur de longues échelles de temps.
Une limitation à garder à l'esprit dans les modèles HOS est que, puisque l'élévation de la surface est une fonction à valeur unique, le phénomène de déferlement des vagues ne peut être reproduit. De plus, d'un point de vue numérique, l'approche d'une telle situation peut conduire à l'arrêt de la simulation, en fonction également de la résolution spatiale utilisée.
Les sorties du modèle sont le potentiel et l'élévation de la surface dans l'espace physique et spectral. La figure 1 montre, par exemple, un état de l'élévation de la surface à un instant donné dans sa représentation spectrale et physique.



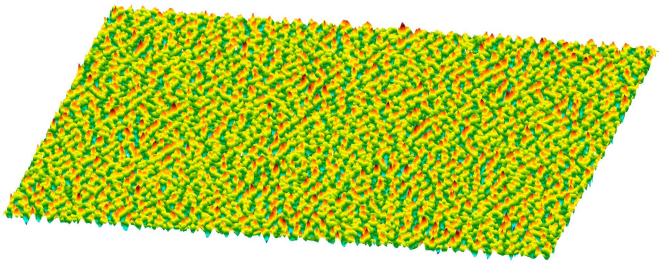


Figure 1 : Spectre et représentation physique correspondante de l'élévation de surface

A partir de l'analyse de ces deux grandeurs, il est possible de quantifier statistiquement la fréquence des vagues extrêmes, en calculant la densité de probabilité et d'autres indicateurs statistiques. Cependant, afin d'obtenir des statistiques robustes, il est conseillé d'effectuer plusieurs simulations pour avoir différentes réalisations du même spectre initialisé chaque fois avec des phases différentes, afin de pouvoir faire des moyennes globales.

En même temps, il est également possible d'obtenir des informations sur la forme géométrique et la hauteur maximale des vagues, ce qui est nécessaire pour caractériser leur type.

L'insertion de ce type de modèle dans une chaîne opérationnelle hypothétique serait difficile à réaliser car une seule réalisation du spectre en un point géographique a un coût de calcul non négligeable. Il serait donc irréaliste de réaliser des simulations avec cette méthode en temps réel en tout point de la Méditerranée et à chaque instant, en les réinitialisant à chaque fois avec les sorties d'un modèle à grande échelle tel que WWIII.
L'objectif est donc d'intégrer indirectement les informations obtenues par la méthode HOS dans la chaîne opérationnelle, par exemple en recherchant des corrélations entre la fréquence des événements extrêmes et certaines quantités ou paramètres moyens pouvant être calculés directement à partir des spectres, tels que la hauteur significative des vagues, la dispersion angulaire du spectre, le BFI, etc. La figure 2 ci-dessous montre la dépendance de Pn / Pr, c'est-à-dire la probabilité que les vagues aient une hauteur supérieure à deux fois la hauteur significative, normalisée avec la même probabilité obtenue à partir de la distribution de Rayleigh (Pr = 3,35 x 10-4). Dans ces graphiques, chaque point représente la probabilité obtenue à partir d'une seule simulation HOS initialisée avec un spectre obtenu à partir de la WWIII. Tous les spectres sont extraits pour le même point géographique mais à des moments différents au cours d'une année. En particulier, la position examinée dans ces graphiques est celle liée à l'accident du navire de croisière Louis Majesty survenu le 3 mars 2010, et les points en rouge se rapportent à cette événement.

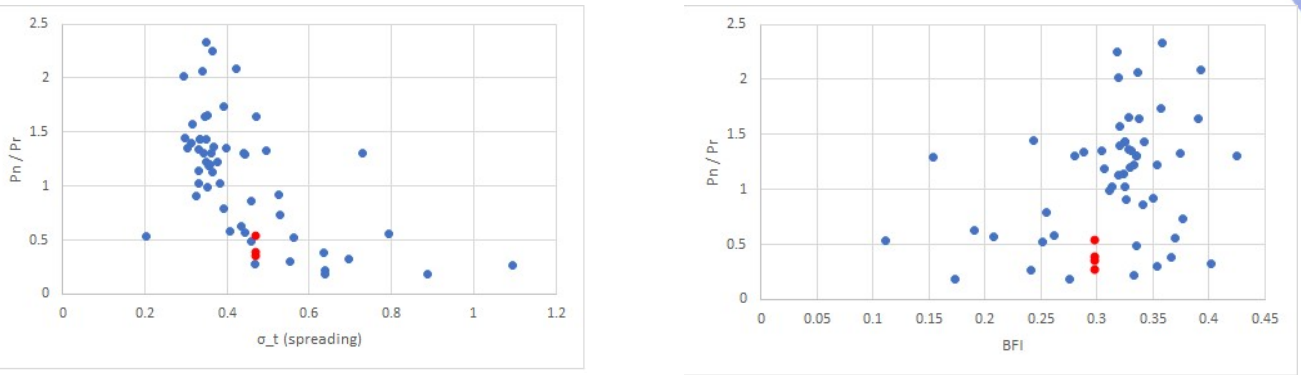


Figure 2 : Corrélation entre la probabilité d'événements extrêmes et la dispersion angulaire du spectre (à gauche) et du BFI (à droite).

Dès cette première analyse, bien que préliminaire, il est possible d'apprécier une dépendance de la fréquence des événements extrêmes à ces deux paramètres. En particulier, il est intéressant de voir comment, dans certains cas, il existe une probabilité qui est même le double de celle prédite par la théorie linéaire avec la distribution de Rayleigh.

Parallèlement à cette analyse, un regroupement des spectres en clusters définis par des paramètres macroscopiques ou par des algorithmes de clustering ou d'apprentissage automatique peut aider à identifier la probabilité des vagues extrêmes dans un mode opérationnel. Avec une base de données suffisante de cas historiques regroupés en un nombre limité de clusters, il serait en effet possible de simuler avec la méthode HOS uniquement de tels spectres de "type" a-priori, et d'associer en temps réel chaque point (spectre) d'une simulation de WWIII au cluster correspondant, afin d'extrapoler les informations statistiques d'intérêt concernant les événements extrêmes.

IV. RÉSUMÉ

L'étude des phénomènes météorologiques et météomarins à faible prévisibilité est fondamentale pour aborder correctement la question des risques liés à la météo pour la sécurité de la navigation.

La plupart des accidents se produisent dans des conditions météorologiques et maritimes extrêmes ou dans des conditions difficiles à prévoir avec les modèles couramment utilisés. Ainsi, des phénomènes se produisent avec une faible probabilité, mais potentiellement très dommageables, et donc avec un risque résultant qui est loin d'être négligeable.

Dans le domaine de la coopération, il existe des outils, tels que des dispositifs d'observation et des modèles, pour étudier ces phénomènes et établir des procédures pour améliorer leur prédiction. Les partenaires LAMMA et ARPAL, en particulier, ont commencé une comparaison systématique des méthodes et procédures qui seront décrites dans les produits suivants de la composante T1 du projet. En particulier, les activités sur lesquelles les études GIAS se concentreront sont les suivantes

- L'étude de l'occurrence des brouillards d'advection, et de la capacité des modèles de prévision utilisés à les prévoir. Cette étude bénéficiera également de la présence de nouvelles données d'observation grâce au réseau d'observation de la visibilité qui sera bientôt installé.
- L'étude des conditions d'apparition et des procédures de prévision des orages et de certains phénomènes associés, tels que les rafales de vent et les trombes d'air.
- L'étude des conditions favorables au développement des vagues scélérates en mer.

Chacun de ces phénomènes est abordé à partir des prévisions des modèles à grande échelle auxquels sont associées les conditions favorables au développement des phénomènes à plus forte probabilité (par exemple: indices de prévision des tempêtes, indices liés à la probabilité de développement des vagues scélérates, probabilité de développement du brouillard, etc...).

V. APPENDICE

SYSTÈMES UTILISÉS PAR ARPAL

L'ARPAL garantit une surveillance météoro-hydrologique quantitative sur le territoire régional, avec une attention particulière au contrôle de l'évolution des phénomènes extrêmes. Le suivi, pour les besoins de la protection civile, se fait en temps réel grâce à différents instruments :

Outils d'observation :

-données provenant du réseau régional d'enquêtes OMIRL, directement géré par le CFMI-PC;
-les radars météorologiques de Monte Settepani et Monte Verrugoli ;
-données acquises par le satellite MSG ;
-données de la bouée de mesure du courant et de la météorologie à Capo Mele (SV) ;
-Les données sur les éclairs du réseau CESI.

Outils de prévision:

- Modèles météorologiques mondiaux
- Modèles météorologiques LAM
- Machine Learning (en cours sur ce projet T.1.1..2)

OMIRL

La principale source de données est le réseau OMIRL, l'observatoire hydrologique et météorologique régional. Il est composé d'environ 200 stations météo-hydrologiques télémétriques et d'une trentaine de stations mécaniques, vestiges des anciennes stations traditionnelles héritées de l'ancien Service hydrographique national.

Le site de l'Observatoire Hydrologique et Météorologique de la Région Ligurie (OMIRL) (https://omirl.regione.liguria.it/#/map) permet de consulter, en temps réel, les observations géo-référencées enregistrées par les capteurs au sol. Il permet également de visualiser les cartes de précipitations et de nébulosité traitées à distance par le radar et le satellite de Monte Settepani.

Toutes les stations appartiennent à la Regione Liguria et sont gérées par ARPAL conformément à la loi régionale n° 20/2006.

Stations de télémesure 202 (dont 16 cae liguria)

- précipitations 166 (y compris cae liguria 13)
- température 160 (y compris cae liguria 13)
- humidité 80 (y compris cae liguria 1)
- pression 12

- rayonnement solaire 28 (y compris cae liguria 1)
- vent 49 (y compris cae liguria 1)
- hydromètres 51 (y compris cae liguria 5)
- neige 12 (y compris cae liguria 1)
- héliophanie 3

Deux radars sont actuellement installés en Ligurie : le radar en bande C de Monte Settepani (SV) et le radar en bande X de Monte Verrugoli (SP), ce dernier ayant été réalisé grâce au projet Sicomar Plus. L'utilisation intégrée de cet instrument avec d'autres capteurs, tels que des capteurs ponctuels au sol ou des satellites météorologiques, permet d'avoir une vision plus complète des observables météorologiques, contribuant ainsi à augmenter le niveau de sécurité en mer et sur terre.

Les caractéristiques techniques du radar de Monte Verrugoli sont les suivantes:

bande de fréquences	Band X-band (fréquence de fonctionnement: 9400-9500MHz)
portée	108 km
pic puissance	10 kW
résolution spatiale	450 m
amplitude du faisceau d'antenne	3°
élévations	0.5°, 1°, 1.5°, 2°, 2.5°, 3°, 3.5°, 4°, 4.5°, 5°
resolution temporelle des scans	15 minuti
mesures à double polarisation	NON
mesures Doppler	NON
liste des produits disponibles	Volumes de réflectivité
compatibilité avec le format ODIM OPERA	OUI – Format BUFR, volumes polaires disponibles

Les caractéristiques techniques du radar de Monte Settepani sont les suivantes:

Fréquence de fonctionnement	5600-5650 MHz
pic puissance	250 kW
polarisation	Horizontal/Vertical
amplitude du faisceau d'antenne	< 1 deg
portée maximale	500 Km
impulsions transmises	0.5 / 1.5 / 3 s
paramètres mesurés	Réflectivité
	Réflectivité différentielle
	Vitesse radiale Doppler
	Variance de la vitesse
	Phase différentielle
	Coefficient de corrélation

Le système de surveillance météorologique en Ligurie occidentale

Le système de surveillance météorologique de Ponente Ligente est composé des éléments suivants :

- Bouée météorologique principale amarrée avec sa propre ligne d'ancrage au large de Capo Mele (ci-après "bouée principale"),
- Bouée de remplacement ou de secours pour les vagues (ci-après "bouée de secours"),
- Base logistique équipée de conteneurs-abris,
- Lignes de transmission de données,
- Centre d'opérations,
- Base de données,
- Site web permettant de visualiser et de demander des données historiques et en temps réel (à déclasser),
- Les procédures HW et SW qui garantissent son fonctionnement

La bouée principale mesure toutes les 30 minutes :

- le vent (direction, intensité, rafales) via un capteur anémométrique (Gill WindSonic) ;
- pression, humidité, température de l'air (baromètre numérique Vaisala BAROCAP® PTB330, sonde d'humidité et de température Vaisala HUMICAP® HMP155) ;
- vague (hauteur significative et maximale, période, direction d'origine, capteur WaveSense d'Oceanor) ;
- le courant (direction de propagation et intensité tous les 3,5 mètres, d'une profondeur de 3,5 à 70 mètres, capteur Nortek Aquadopp Profiler) ;
- la température de la mer à une profondeur d'environ 0,5 mètre (capteur Nortek Aquadopp Profiler).

La bouée de secours mesure toutes les 30 minutes :

- vague (hauteur significative et maximale, période, direction d'origine) ;
- courant (direction de propagation et intensité à la surface uniquement) ;

Les données de la bouée :

- Les données en temps réel sont disponibles gratuitement et archivées en ligne à l'adresse www.arpal.gov.it ;
- sont disponibles à partir de 12h30 UTC le 23/02/2012 ;
- archivées et disponibles en ligne sur le système régional d'information environnementale de la Ligurie (SIRAL) ;
- en temps réel transmis au service météorologique de l'armée de l'air pour être introduit dans le réseau international GTS (numéro de bouée OMM 61200) ;
- sont utiles pour la protection civile, la sécurité de la navigation et la pêche ;
- Ils sont utilisés pour concevoir des ouvrages côtiers, pour étudier la dynamique des plages, pour valider les modèles de prévision des vagues et des courants.

Les coordonnées du point de bouée ont les caractéristiques suivantes:

- Le point d'ancrage de la bouée opérationnelle est situé à environ 3 miles nautiques de Capo Mele (Savona) au point de coordonnées (basé sur le Datum WGS 84) :
- de latitude 43°55'05.84" Nord ;
- longitude 08°10'41.99" Est ;
- latitude et longitude basées sur le DATUM WGS 84 ;
- profondeur d'environ 90 mètres
- un cercle de virage d'environ 200 mètres autour du point de bouée.

La capitainerie du port d'Alassio a réglementé la navigation à proximité de la bouée par les ordonnances n° 13 et 10 de 2012.

La bouée principale :

- est une bouée Fugro Oceanor SEAWATCH Midi 185 ;
- a l'apparence d'un disque jaune de 1,85 mètre de rayon ;
- a un château de 3 pieds au sommet à 2 mètres au-dessus du niveau de la mer ;
- a des réflecteurs de radar passif et des bandes réfléchissantes ;
- la nuit, il se distingue par un feu jaune clignotant (5 clignotements toutes les 20 secondes).

La bouée de secours :

- est une bouée Fugro Oceanor SEAWATCH Mini II ;
- Il a l'apparence d'une quasi-sphère d'un rayon d'environ 1,2 mètre et est de couleur jaune ;
- la nuit, il se distingue par un feu jaune clignotant (5 clignotements toutes les 20 secondes).

Cartes de station proposées

Immagine stazione Boa ARPAL di Capo Mele	Carte de station	
	Code de la station	Numéro de bouée OMM 61200
	Ville	Andora (SV)
	Latitude	43°55′05.84″ N
	Longitude	08°10′41.99″ E
	Hauteur au-dessus du niveau de la mer [m]	-
	Type	Bouée à vagues
	État du système	Opérationnel
	Paramètres météorologiques observés	le vent (direction, intensité, rafale) pression, humidité, température de l'air

	Paramètres océanographiques observés	vague (hauteur significative et maximale, période, direction d'origine; courant de 3,5 à 70 m; température de surface de la mer
	Capteurs installés	Gill Wind Sonic (météo) ; Jeune Marine RM (météo) ; Baromètre numérique Vaisala BAROCAP® PTB330 (météo) ; Sonde d'humidité et de température Vaisala HUMICAP® HMP155 (météo) Oceanor WaveSense (mer) ; Nortek Aquadopp Profiler (mer) ;
	Taux d'échantillonnage du capteur	1 Hz
	Transmission de données	toutes les 30 minutes
	Mise à jour web	toutes les 2 heures

	Raisons du suivi	Surveillance de la météo marine
	Fréquence d'entretien	> 30 jours
	Format des données acquises	ASCII
	Notes	

Modélisation numérique

ARPAL gère une chaîne opérationnelle de modèles météorologiques à haute résolution pour la prévision numérique du temps.
Les modèles utilisés ont été développés et sont mis à jour par l'Institut ISAC-CNR de Bologne, dans le cadre d'un accord de coopération scientifique pluriannuel avec ARPAL.

La chaîne de modélisation comprend le modèle hydrostatique BOLAM et le modèle non hydrostatique MOLOCH, qui est branché sur BOLAM.
Les conditions initiales et limites de BOLAM sont fournies par les quatre analyses (00, 06, 12, 18 UTC) et prévisions quotidiennes du modèle global ECMWF (EU) et permettent d'avoir des runs mis à jour toutes les 6 heures.

Le modèle BOLAM est ajusté directement à partir des champs de niveau hybride du CEPMMT.
Le domaine d'intégration de BOLAM couvre la majeure partie de l'Europe avec une résolution de 0,1 degré, pour un total de 362 x 322 points de grille sur 45 niveaux. Le domaine MOLOCH couvre l'Italie du Nord à une résolution de 0,02 degré avec 206 x 202 points de grille sur 50 niveaux verticaux.
Les intégrations numériques sont réalisées sur un cluster de PC dans un environnement GNU/Linux CentOS : 5 hôtes équipés d'un processeur Intel 17-980X 4.20GHz, pour un total de 30 cœurs.

Actuellement, l'affichage sur Firefox n'est pas optimal en raison de l'absence d'une implémentation satisfaisante du rendu des images dans le navigateur. Nous espérons minimiser le problème en peu de temps.

BIBLIOGRAPHIE

Bendix, J., Thies, B., Nauss, T., & Cermak, J. (2006). A feasibility study of daytime fog and low stratus detection with TERRA/AQUA-MODIS over land. Meteorological Applications, 13, 111–125.

Cermak, J. (2018). Fog and Low Cloud Frequency and Properties from Active-Sensor Satellite Data. Remote Sens. 2018, 10, 1209.

David, N. (2018) Utilizing microwave communication data for detecting fog where satellite retrievals are challenged. Nat Hazards 94, 867–882 (2018). https://doi.org/10.1007/s11069-018-3428-3

Ellrod, G. P. (1995). Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. Weather and Forecasting, 10, 606–619.

Gultepe, I., Pagowski, M., & Reid, J. (2007). A satellite-based fog detection scheme using screen air temperature. Weather and Forecasting, 22, 444–456.

Tian Wang, Yuzhu Liang, Weijia Jia, Muhammad Arif, Anfeng Liu, Mande Xie, (2019). Coupling resource management based on fog computing in smart city systems. Journal of Network and Computer Applications, Volume 135, 2019, Pages 11-19, ISSN 1084-8045, https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.021.

Zhang, S., & Yi, L. (2013). A comprehensive dynamic threshold algorithm for daytime sea fog retrieval over the Chinese adjacent seas. Pure and Applied Geophysics, 170, 1931–1944.

Wilcox, Eric M. (2017). Multi-spectral Remote Sensing of Sea Fog with Simultaneous Passive Infrared and Microwave Sensors, in Koracin, D. and Dorman, Clive E., Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations, Modeling, and Forecasting. Springer International Publishing 2017. doi:10.1007/978-3-319-45229-6_11.

Heo, Ki-Young & Park, Suhyun & Ha, Kyung-Ja & Shim, Jae□Seol. (2014). Algorithm for sea fog monitoring with the use of information technologies. Meteorological Applications. 21. 10.1002/met.1344.

World Meteorological Organization, (2018) Guide to Instruments and Methods of Observation Volume I – Measurement of Meteorological Variables