

Fiche pédagogique : Du vent dans les voiles et des embruns sur le pont

Pendant longtemps les bateaux ont progressé grâce au vent, les bateaux de l'Antiquité et du moyen âge utilisaient aussi la force motrice musculaire avec des rames ou avirons. Mais avec les grands voyages de l'époque moderne, c'est la propulsion vélique qui va dominer jusqu'à l'invention de la vapeur et des premiers moteurs.

Pour naviguer à la voile une bonne connaissance de vents est donc indispensable.

1

Le vent, un phénomène complexe

En météorologie, le **vent** désigne le **mouvement horizontal de l'air**. Il correspond au mouvement des masses d'air confrontées aux différences de pression atmosphérique.

Le vent se forme de la différence de température entre deux masses atmosphériques. Le globe terrestre en mouvement et les irrégularités géographiques contribuent ensuite son évolution.

Lorsqu'une **masse d'air se réchauffe sous l'effet des rayons du soleil** ou au contact d'un milieu chaud, elle devient **plus légère, et monte**. **En altitude, la masse d'air se refroidit et descend** de nouveau. Pendant ce temps, la Terre en rotation a légèrement pivoté sur elle-même. La masse d'air redescend ainsi plus à l'Est si elle se trouve dans l'hémisphère Nord, plus à l'Ouest si elle se situe dans l'hémisphère Sud.

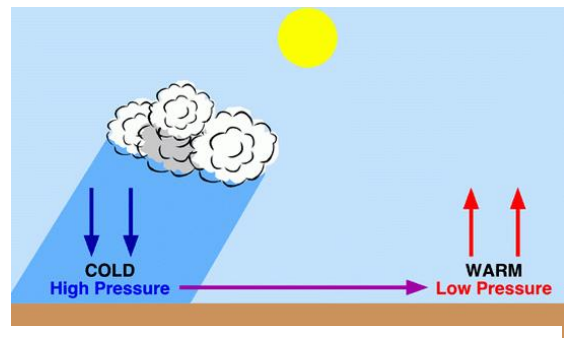
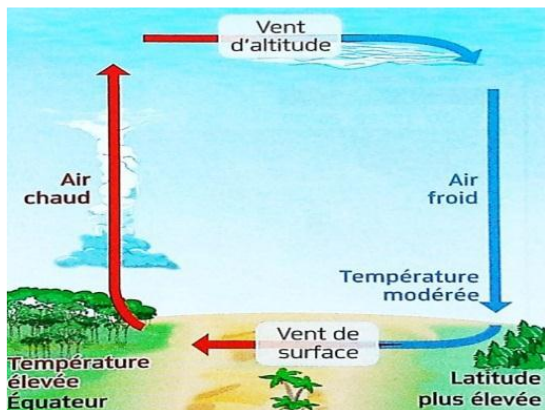


Figure 1 : circulation des masses d'air avec hautes et basses pressions © physicalgeography.net/fundamentals/7n.htm

À l'endroit où l'air a été réchauffé, une zone de basse pression ou dépression se forme. Là où l'air froid descend se crée à l'inverse une zone de haute pression ou d'anticyclone. Mécaniquement, un fluide tend à rétablir une pression homogène entre toutes les zones : la masse d'air quitte donc l'anticyclone pour se diriger vers la dépression.



En réchauffant la surface terrestre, le Soleil réchauffe l'air ambiant : les différences de températures mettent en mouvement les masses d'air. Ces déplacements de masses d'air contribuent à des transferts de chaleur de l'équateur vers les pôles.

Figure 2 : les mouvements de l'air à la surface du globe.

Expérience : comparer le mouvement de l'air chaud à celui de l'air froid. La fumée de l'encens permet de visualiser ce mouvement.

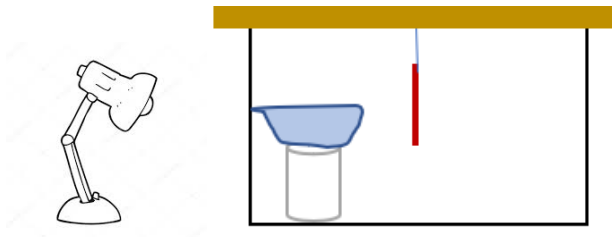
Matériel :

- ✓ Aquarium
- ✓ Un spot (source de chaleur)
- ✓ Un pain de glace
- ✓ Un bâtonnet d'encens + planchette fixée au couvercle
- ✓ Un couvercle assez grand pour recouvrir l'aquarium

Étape 1 : Placer le pain de glace sur la tranche d'un côté de l'aquarium, et le spot de l'autre côté. Disposer un bâton d'encens au milieu de l'aquarium. Recouvrir l'aquarium avec le couvercle mais en prévoyant des trous ou un espace.

Étape 2 : allumer le bâtonnet d'encens et observer le mouvement de la fumée

2



Que voit-on ?

Conclusion

La circulation atmosphérique globale

La circulation atmosphérique fait référence aux mouvements de l'air à grande échelle dans l'atmosphère terrestre. Elle est principalement due aux différences de température, de pression et d'humidité à travers la planète. La circulation atmosphérique est un élément clé du système climatique de la Terre et joue un rôle essentiel dans la distribution de la chaleur, de l'humidité et des substances chimiques à travers le globe.

Le fait que la Terre soit chauffée de façon irrégulière par le soleil constitue le principal moteur de circulation atmosphérique de la planète ; c'est aussi ce phénomène qui donne naissance au modèle de circulation de l'air selon trois types de cellules, de Hadley, de Ferrel et polaire.

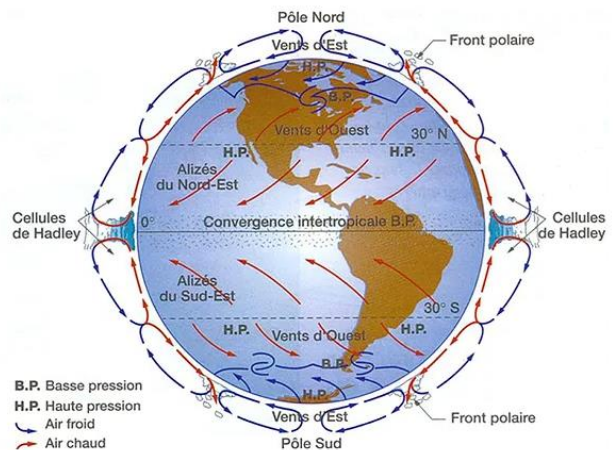


Figure 3 : Vents dominants à la surface du globe ©sbssa.ac-bensacon.fr

- **La cellule de Hadley (ou équatoriale)** est un mode de circulation de l'air ressemblant à un tapis roulant, qui prédomine dans l'atmosphère tropicale ; elle est liée aux alizés, aux bandes pluvieuses tropicales, aux déserts subtropicaux et aux jet-streams ;

- **La cellule de Ferrel (ou tempérée)** a trait aux flux de surface dans la zone tempérée, et donc dans une zone des vents d'Ouest entre 30 et 60 ° de latitude ;
- **La cellule polaire**, entre 60 °N et le Pôle Nord, donne des vents souvent irréguliers et faibles pour l'hémisphère nord.

Un autre facteur clé dans la formation du vent est la rotation de la Terre sur son axe : **La force de Coriolis, provoqué par la rotation de la Terre, dévie les corps qui se déplacent à la surface de notre planète, vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.** En conséquence, les vents qui tournent autour du centre d'un cyclone le font dans le sens inverse à celui des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord, dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud.

3

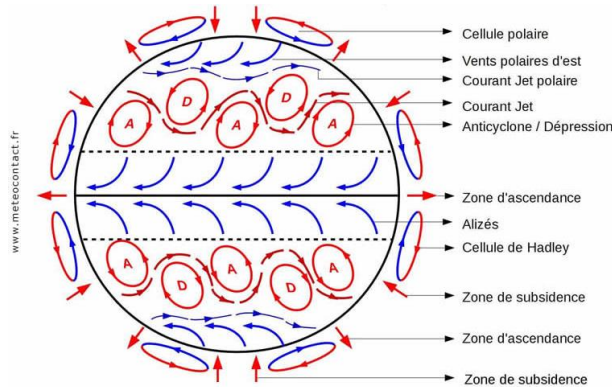


Figure 4 : circulation générale de l'atmosphère

Expérience 2 : Mettre en évidence la force de Coriolis

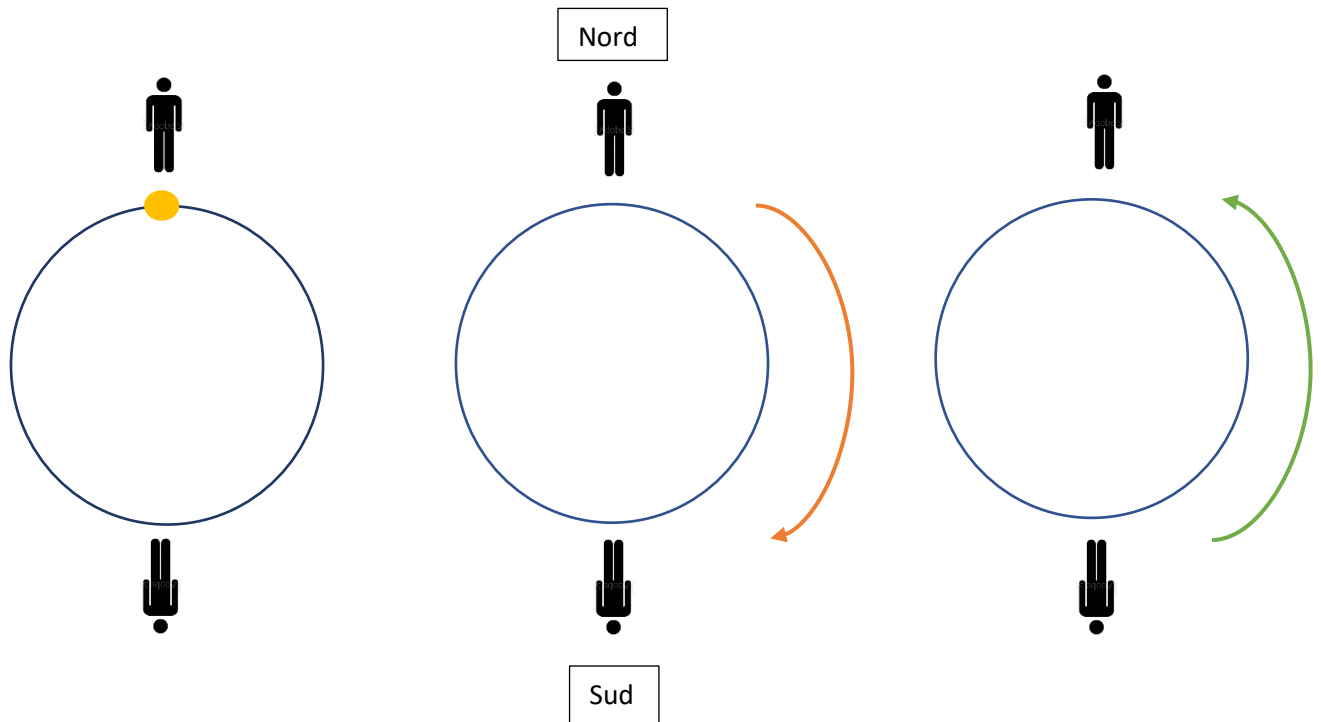
Matériel :

- ✓ Plateau tournant
- ✓ Bille
- ✓ Liquides visqueux colorés de deux couleurs différentes (gouache)

Étape 1 : lancer la bille sans rotation du plateau

Étape 2 : Impulser un mouvement de rotation vers la droite et lancer la bille

Étape 3 : idem mais vers la gauche



Que voit-on ?

Conclusion

4

Cette déviation influe sur la direction du vent et contribue à la formation de systèmes de vents dominants, tels que les alizés ou les courants-jets.

Le courant-jet (ou jet-stream) est un « tube de vent » très fort d'ouest, de 2 à 3 kilomètres d'épaisseur et de plusieurs milliers de km de long ; il est situé entre 8 et 12 km d'altitude (au sommet de la troposphère), selon la saison, et selon qu'il se situe plus près des pôles ou au contraire vers les tropiques.

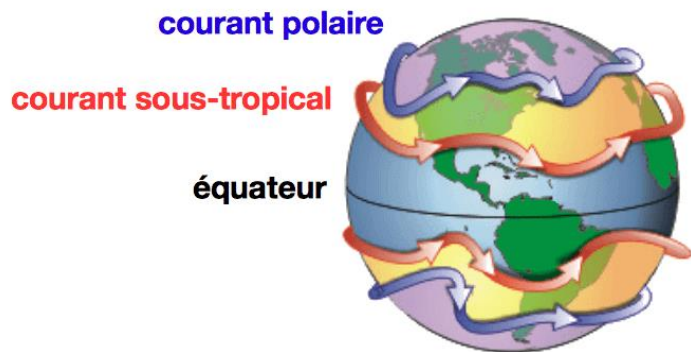
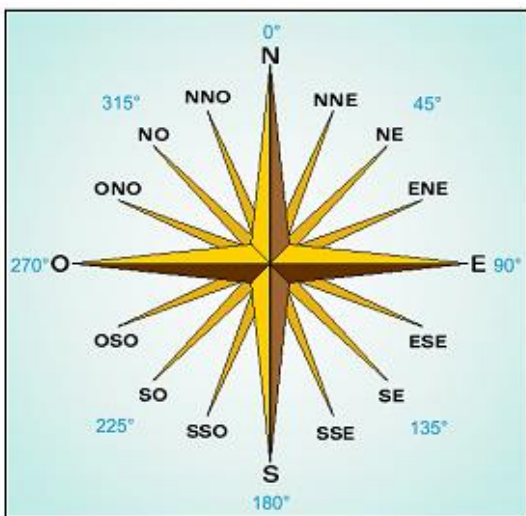


Figure 5 : les différents courants d'Altitude (jet-Stream). Celui qui touche l'Europe est le jet-stream polaire. © Lyndon State collège Meteorology, Wikipédia commons, domaine public

La présence du courant-jet est liée à un fort contraste de température aux moyennes latitudes entre d'un côté l'air chaud des latitudes tropicales et de l'autre l'air froid des zones polaires. La vitesse du vent dans ce courant-jet est proportionnelle à cet écart de température. Dans certaines conditions exceptionnelles, le vent peut atteindre dans le courant-jet la **vitesse de 400 km/h**.

Mesurer le vent

La mesure comprend deux paramètres : sa **direction** et sa vitesse ou **force**. La vitesse est exprimée communément en km/h ou m/s. Marins et pilotes utilisent les nœuds (1 nœud = 1,852 km/h). La mesure du vent est toujours une moyenne sur une période donnée.



La direction du vent se mesure en degrés par rapport au Nord géographique ; on peut aussi l'indiquer avec des mots : un vent de Nord, un vent de Sud-Ouest... C'est l'affaire de la girouette ou de la manche à air.









La vitesse du vent peut être estimée assez précisément avec la manche à air. Elle est mesurée à l'aide d'un anémomètre. L'unité standard internationale est le mètre par seconde (m/s)

On retient la vitesse moyenne, c'est-à-dire la moyenne des dix dernières minutes et la vitesse instantanée, établie sur une demi-seconde. La vitesse instantanée varie très vite au gré des tourbillons dans l'air, qu'on appelle la turbulence.

À l'aide de l'anémomètre de la boussole et des pavillons du musée mesure la vitesse et la direction du vent

Vitesse moyenne du vent : km/h Rafales : km/h

5

							
Nord	Nord-est	Est	Sud-est	Sud	Sud-ouest	Ouest	Nord-ouest

La saisonnalité des vents

Les vents ne soufflent pas de manière constante comme nous l'avons vu, mais ils sont aussi saisonniers, leur moteur étant les différences de températures, les changements de saison influent donc sur leur présence, leur direction et leur intensité.

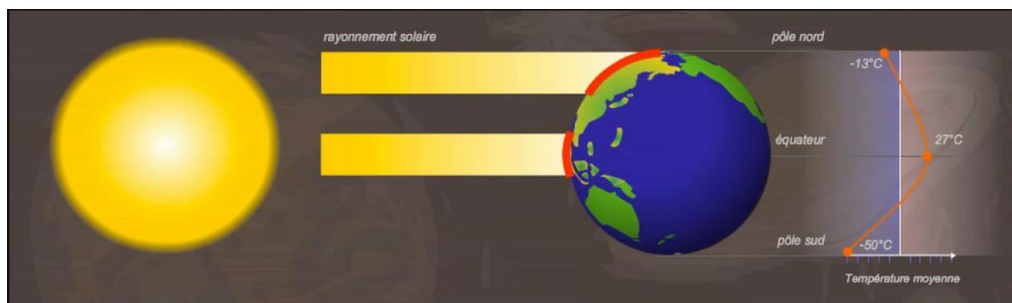


Figure 7 : La répartition de l'énergie solaire à la surface de la Terre ©elmerlickamul.wixsite

La zone de convergence intertropicale (ZCIT)

Zone de la surface du globe terrestre caractérisée par un climat chaud et située entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne. Elle correspond à l'espace où les alizés de nord-est provenant de l'hémisphère Nord et les alizés de sud-est provenant de l'hémisphère Sud se rejoignent.

Les alizés sont des vents dus à l'échauffement des couches d'air, qui sont frappées verticalement par les rayons solaires dans le voisinage de l'équateur. Dans les parties les plus chaudes des océans, l'air, violemment échauffé, devient de plus en plus léger et s'élève dans l'atmosphère. C'est la **région des calmes équatoriaux, ou « pot au noir »** ainsi que l'appelle les marins qui redoutent de se retrouver dans ses parages. En effet l'air est presque immobile, le ciel est constamment nuageux, la pluie tombe à torrents et les orages fréquents. La bande de calmes qui sépare les alizés de Nord-Est de ceux de Sud-Est n'a pas une position tout à fait fixe. Elle monte vers le Nord pendant notre été et redescend pendant notre hiver vers le sud, suivant le mouvement apparent du soleil.

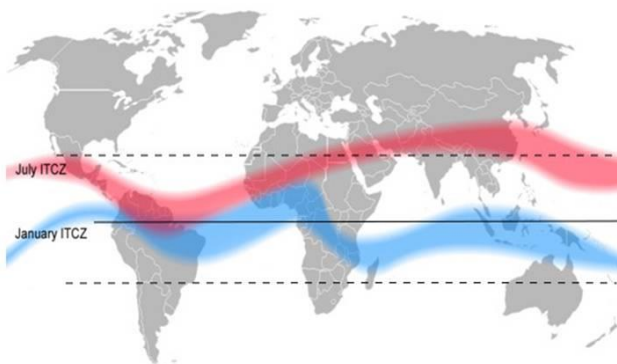


Figure 8 : Positions extrêmes du courant d'est équatorial en juillet (couleur rouge) et en janvier (couleur bleue). © Mats Halldin



Ceinture dépressionnaire dans la zone de convergence inter tropicale pendant la saison d'été, que les cumulonimbus (grandes tâches blanches) rendent visibles. Photo satellite prise le 12/06/2005 ©NOAA



Un pot très noir, en janvier 2018, pour le VO65 Brunel, durant la 4e étape de la Volvo Ocean Race. | © YANN RIOU / VOLVO OCEAN RACE

La mousson est un mot qui provient de l'arabe et signifie saison, désignant notamment la saison favorable à la navigation vers l'Inde dans l'océan Indien. Dans ce climat, il existe une alternance entre saisons sèches et humides, et de vents périodiques qui participent à la mousson. Ces vents connaissent des inversions de direction saisonnières le long des rivages de l'océan Indien, particulièrement dans la mer d'Arabie et le golfe du Bengale. Les moussons sont causées par le fait que la terre s'échauffe et se rafraîchit plus vite que la mer. Vents soufflent du sud-ouest pendant six mois et du nord-est pendant l'autre semestre, entraînant des cycles climatiques très marqués entre saisons sèche et humide.

Au cours de sa navigation à bord du Marie-Thérèse, le célèbre navigateur Bernard Moitessier a dû tirer des bords à cause de la mousson et des vents qui entravaient sa progression.

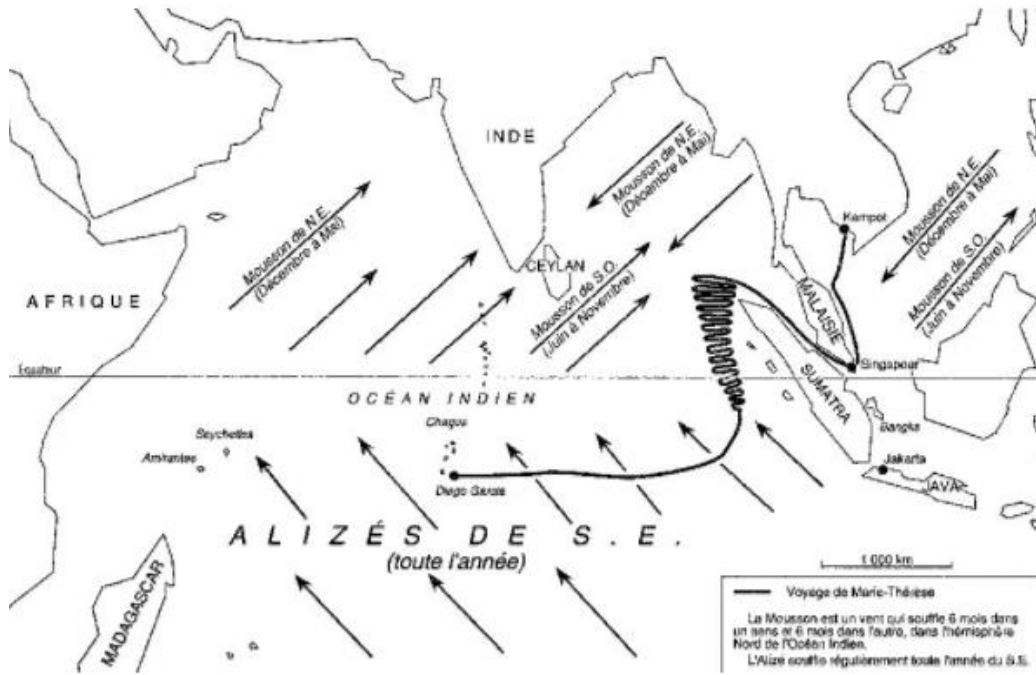
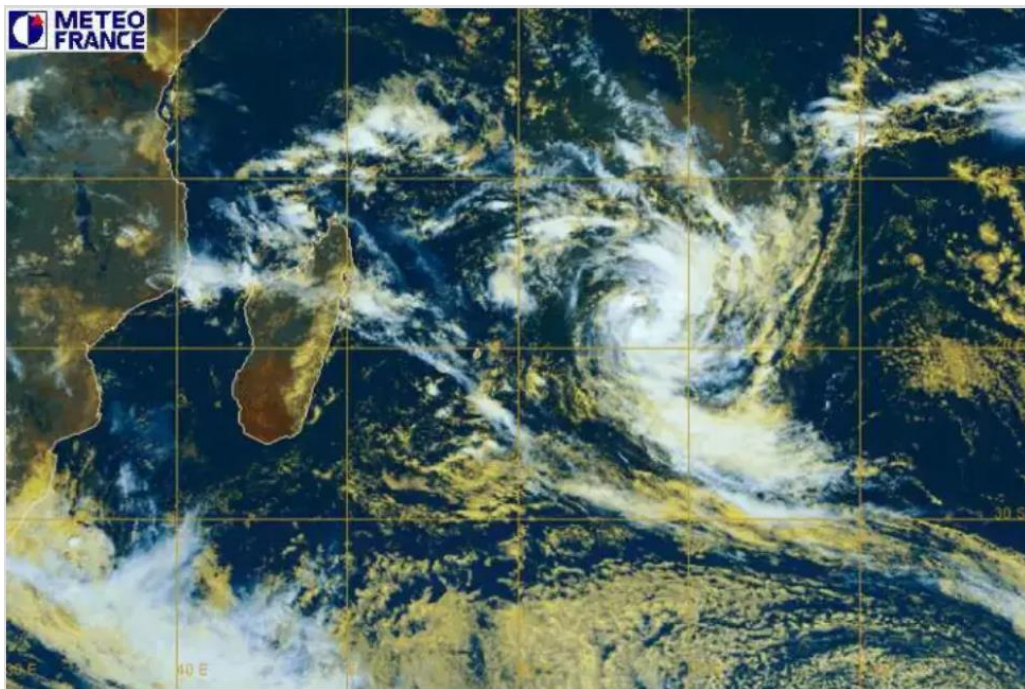


Figure 9 : Carte extraite du livre Vagabond des mers du sud ed. Arthaud



Tempête tropicale Dongo à l'île de la Réunion le 10/01/ 2009 ©Météo France

L'échelle de beaufort

L'Amiral anglais, **Francis Beaufort** (1774-1857) a créé cette **échelle anémométrique** qui porte désormais son nom.

Initialement destinée à améliorer la concision et la précision des journaux de bord, elle est aujourd'hui d'un **usage universel en météorologie marine** ; elle est également applicable sur la terre ferme à travers des descriptions de substitution concernant l'observateur et le milieu environnant.

Cette échelle de mesure, comporte 13 degrés (de 0 à 12), elle exprime la force du vent mesurée en degrés Beaufort ou niveau de force, à une hauteur de 10 mètres au-dessus d'un terrain plat et découvert avec une vitesse moyenne du vent sur une durée de dix minutes.



Force 12, embruns sur le pont visibilité réduite, creux de 12 à 16m ©National Oceanic and Atmospheric Administration USA, Wikipédia Commons

ECHELLE DE BEAUFORT				
ECHELLE	TERME	VENT MOYEN EN KM/H	EFFETS EN MER	EFFETS SUR TERRE
0	CALME	<1 km/h	Mer lisse, sans vague	Fumées verticales
1-2-3-4-5	BRISES	1 à 38 km/h	Quelques rides à quelques vagues (vagues: 0.2 à 2.5 m)	La fumée indique la direction du vent, les drapeaux flottent
6	VENT FRAIS	39 à 49 km/h	Crêtes d'écumes blanches, embruns (vagues: 2.5 à 4 m)	Les branches des arbres s'agitent, parapluies qui se retournent
7	GRAND FRAIS	50 à 61 km/h	Trainées d'écumes, lames déferlantes (vagues: 4 à 5.5 m)	Les arbres se balancent, la marche contre le vent est freinée
8	COUP DE VENT	62 à 74 km/h	Tourbillons d'écumes à la crête des lames (vagues: 5.5 à 7 m)	Les branches d'arbres peuvent casser, la marche est difficile
9	FORT COUP DE VENT	75 à 88 km/h	Lames déferlantes grosses à énormes, visibilité réduite (vagues: 7 à 9m)	Le vent peut endommager les bâtiments, envol de tuiles
10	TEMPÊTE	89 à 102 km/h	Très grosses lames à longue crête en panache (vagues: 9 à 12m)	Dégâts importants aux bâtiments, arbres parfois déracinés
11	VIOLENTE TEMPÊTE	103 à 117 km/h	Lames exceptionnellement hautes (vagues: 12 à 16m)	Ravages étendus et importants
12	OURAGAN	>128 km/h	L'air est plein d'écume et d'embruns (vagues >16m)	Dégâts majeurs et catastrophiques

Figure 10 : tableau de l'échelle de Beaufort ©meteo.bzh

On note sur une carte météo le vent avec les symboles suivants. L'orientation de la hampe donne la direction du vent, les barbulles sa force.

1. Peu ou pas de vent
2. 5 nœuds : petite barre à l'arrière de la flèche
3. 10 nœuds : grande barre à l'arrière de la flèche
4. 15 nœuds
5. 20 nœuds
6. 25 nœuds
7. 50 nœuds : drapeau à l'arrière de la flèche
8. 60 nœuds

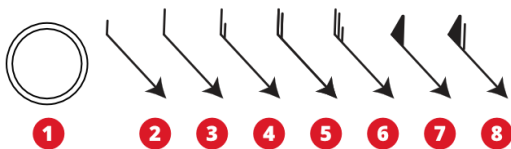


Figure : 11 Symboles représentant les forces des vents ©lavoilepourlesnuls.com

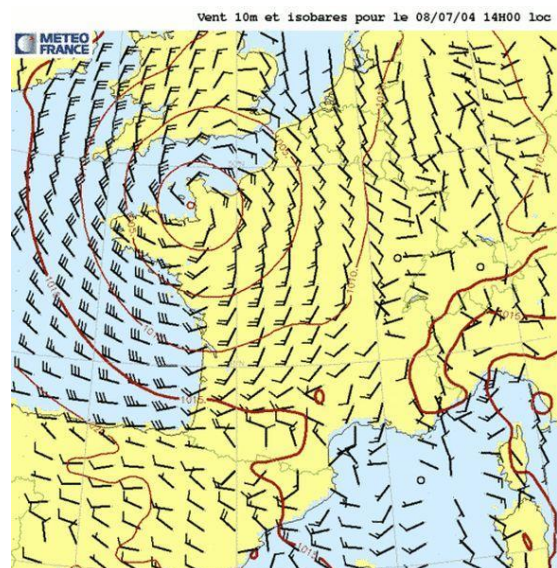


Figure 12 : Des cartes spécifiques sont éditées pour les vents certaines présentent en même temps des isobares © Météo France

La brise thermique

Une brise thermique est un vent local qui résulte de la différence de température entre la surface de la terre et la mer. Elle est inexistante lorsque la température de l'eau et celle de la terre sont identiques. Le relief joue un rôle amplificateur du phénomène (accélération des filets d'air qui s'écoulent le long de la pente).

La brise de mer : Sous l'action du rayonnement solaire, la terre se réchauffe plus vite que la mer. Par conduction, l'air en contact avec la surface terrestre se réchauffe et s'élève. L'air chaud qui s'est élevé dans l'atmosphère est aussitôt

remplacé par de l'air plus froid et chargé d'humidité venu de la mer. Cet air froid et humide se réchauffe à son tour et s'élève. Au cours de son ascension, il va se refroidir et se condenser sous la forme d'un Cumulus. **Le déplacement d'air se fait de la mer vers la terre.** La brise de mer s'établit dès que le contraste thermique Terre – Eau se fait ressentir. Au début, elle est faible puis elle va s'intensifier, elle souvent davantage ressentie en fin d'après-midi.

La brise de Terre : La nuit, le phénomène inverse se produit car la terre se refroidit plus vite que la mer. **Le courant créé se déplace de la terre vers la mer.** L'air chaud et humide s'élevant au-dessus de la surface de l'eau se condense et forme souvent des nuages stratiformes.

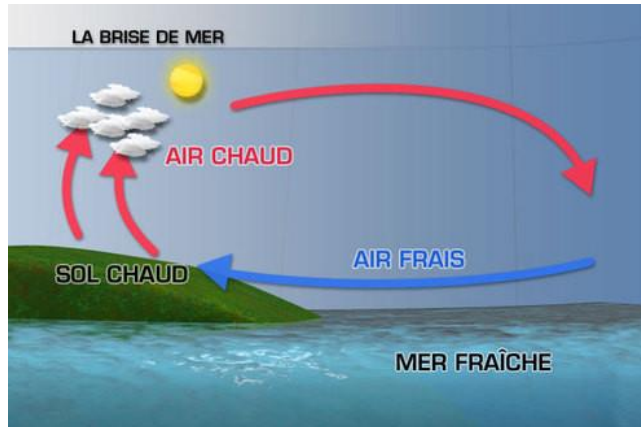


Figure 13 : cycle de formation de la brise de mer ©la Chaîne Météo

Les vagues

Une vague, c'est de l'eau mise en mouvement par une énergie formant une onde. **Le vent est la principale source de cette énergie.** Pour décrire l'état de la mer, les marins distinguent les vagues et la houle.

Comment naissent les vagues ?

Les vagues sont directement issues du vent. La formation des vagues va dépendre du fetch, **Le fetch est le temps et la distance parcourue par un même vent sur un plan d'eau sans obstacle.** On peut dire du fetch que c'est la zone d'élan permettant au vent de lever une mer. Plus le vent va souffler longtemps et sur une grande distance créant ainsi un fetch est important, plus la hauteur des vagues sera grande. La formation des vagues dépend donc :

- De la vitesse du vent
- Du temps pendant lequel il souffle
- De la distance sur laquelle il souffle

La houle : En l'absence de vent, les vagues continuent librement leur propagation, la houle est engendrée ailleurs, c'est la diffusion d'une onde. La houle c'est le souvenir des vagues, la mémoire du fetch.

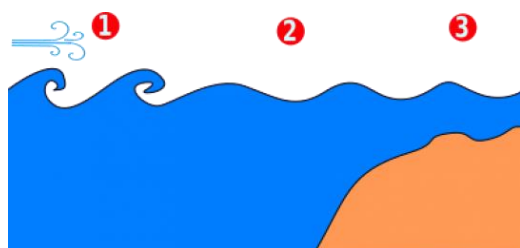


Figure 13 : création et dissipation des vagues ©culture nautique

- 1 Le fetch, création des vagues.
- 2 La Houle, dissipation des vagues
- 3 Fin de vie, déferlement

Pour décrire l'état de la mer, **les marins distinguent la houle et la mer du vent**. Par définition, la mer du vent est créée par le vent qui règne au lieu et à l'heure de l'observation.

Par opposition, la houle a été créée par un vent qui n'est pas le vent présent :

- Soit qu'elle ait été engendrée ailleurs et qu'elle se soit propagée ;
- Soit que le vent générateur ait cessé ou changé de direction.

10

La **vague** constitue un **mouvement ascendant et descendant** résultant, des effets du vent et des courants... Lorsque **sa taille décroît**, on diminue son ampleur sous le terme de **vaguelette** et lorsqu'elles deviennent **plus grosses** on parle alors de **lame**. Une lame est composée d'un creux et d'une crête, qui brise sur quelque chose, déferle en mer en **écumant**. En l'absence de vent les vagues continuent à se propager librement, c'est ce qu'on appelle la houle. Aux abords des côtes, ces vagues sont modifiées par la présence du fond et en particulier la rugosité du fond (rides, roches) qui peut être elle-même due aux vagues.

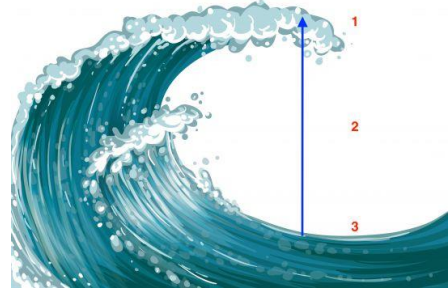
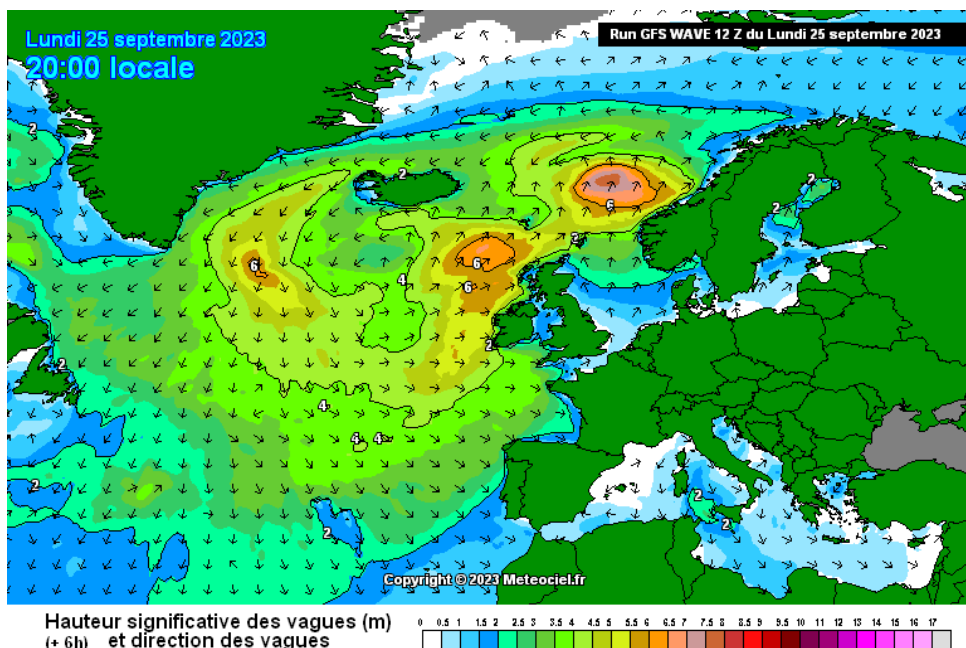


Figure 14 : Silhouette d'une vague © culture nautique

Le point le plus haut d'une vague est appelé la crête **1**, le plus bas c'est le creux **3**. La taille de la vague est déterminée par la hauteur de vague **2** (écart entre la crête et le creux). La période est le temps écoulé entre deux crêtes. Une longue période est synonyme vagues puissantes.

La force du vent influe sur l'état de la mer, la hauteur des vagues et des creux. On trouve des **cartes de houle**, elles sont très utilisées par les surfeurs. La réalisation de ses cartes est possible grâce aux progrès de **l'océanographie satellitaire**. L'altimétrie satellitaire a débuté au début des années 1990. Les altimètres peuvent mesurer, avec une précision de l'ordre du centimètre, les variations de hauteur d'eau à la verticale des satellites. Le grand avantage de ces mesures radars est qu'elles traversent les nuages, contrairement aux images visibles. Cependant, une constellation de plusieurs satellites est nécessaire pour interpoler, dans le temps et l'espace, les multiples traces et reconstruire une carte journalière des variations de hauteur d'eau.



Les vagues scélérates

Les vagues scélérates sont des vagues gigantesques qui se forment de manière spontanée. Véritable cauchemar pour les marins, ces vagues imprévisibles sont décrites comme des murs d'eau qui viennent heurter les navires et sont à l'origine de nombreux naufrages.

Il y a environ une cinquantaine d'années, on doutait encore de l'existence de ces vague-tueuses. Pourtant, plusieurs bateaux naviguant sur différents océans du globe en ont été té victimes, au fil des siècles : En 1942, ce fut le tour du RMS *Queen Mary*, en 1963, du croiseur *Jeanne d'Arc*, sans compter les nombreux cargos, paquebots et autres bateaux de croisière. Il aura fallu attendre 1995 pour que l'existence des vague-tueuses soit officiellement reconnue. Le 1er janvier de cette année-là, l'une d'entre elles vint déferler contre la plateforme pétrolière *Draupner Oil* dans la mer du Nord. Cette station disposait d'une sonde de mesure qui prit précisément la hauteur de la vague : 25,6 mètres !

Aujourd'hui, une vague scélérate est définie comme une vague dont la hauteur est plus de deux fois supérieure à celle des vagues qui l'entourent. Elles peuvent se produire lors de tempêtes dans des mers agitées, mais ont également été aperçues en eaux calmes, ce qui explique pourquoi elles sont si difficiles à prévoir.

Deux grandes théories mathématiques ont vu le jour pour expliquer les mouvements des vagues qui engendrent les vagues scélérates : l'addition linéaire et la focalisation non-linéaire. L'addition linéaire suppose que les vagues se déplacent dans l'océan à des vitesses différentes et que, lorsqu'elles se chevauchent, peuvent se renforcer pour former une vague scélérate. La focalisation non-linéaire suppose quant à elle que les vagues se déplacent en groupes et peuvent se prêter de l'énergie les unes aux autres, donnant parfois naissance à une vague scélérate.



La grande vague de Kanagawa d'Hokusai estampe du XIXème siècle a le profil d'une vague scélérate selon les recherches de l'institut canadien Marinelab

Les allures en voile

On définit l'allure d'un voilier suivant l'angle que fait le voilier avec le lit du vent. Il existe 5 allures du près au vent arrière.

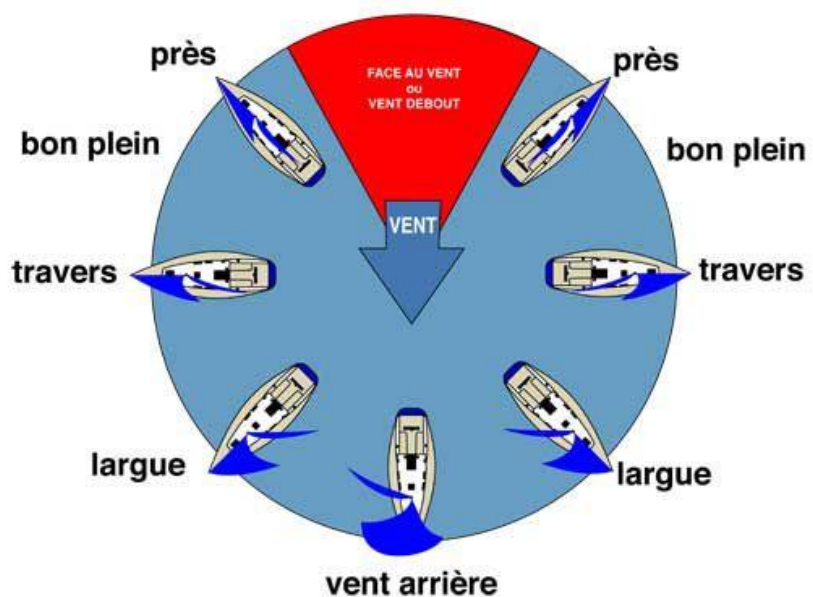


Figure 15 : allures d'un voilier ©voilier.com

Le vent debout, désigne la situation avec un vent qui souffle directement sur l'étrave. Ce n'est pas une allure dans la mesure où le voilier ne peut pas progresser. Quand un voilier se trouve dans cette zone, on dit qu'il est bout au vent ou face au vent. Un voilier devra obligatoirement tirer des bords de près pour avancer, c'est-à-dire zigzaguer.

Le près, ce n'est pas une allure rapide d'autant qu'elle est souvent combinée avec une mer de face. Les voiles sont bordées au maximum, on amène la voile plus près du bordé, à savoir la coque du bateau ; de plus le voilier gîte, il penche d'un côté ou de l'autre. Lorsque le bateau est le plus proche possible du vent, on parle de près serré. Le près est l'allure la plus proche du lit du vent.

Le bon plein, en s'écartant du lit du vent (vers 60°), le voilier se retrouve au bon plein. Les voiles se choquent, le voilier se redresse et gîte moins, il accélère. L'allure est beaucoup plus confortable que le près.

Le travers, à cette allure le vent vient par le travers du bateau (90°). C'est l'allure la plus confortable, car rapide, avec le voilier qui ne gîte pas trop, c'est ce que l'on appelle une allure portante.

Le large, aussi appelé grand large, est une allure rapide, le vent vient de $\frac{3}{4}$ arrière.

Vent arrière, à cette allure, le vent vient de l'arrière du bateau. Le voilier avance au mieux à la vitesse du vent sans pouvoir la dépasser. Souvent sujette au roulis, cette allure n'est pas facile à maîtriser à la barre, car il ne faut pas se laisser embarquer par une vague.

Le lit du vent est un terme technique employé en Marine pour définir la direction dans laquelle souffle le vent, point d'horizon depuis lequel il arrive.



Bon vent !