



LA PLONGEE en MER à COURANT

JEAN-CLAUDE TAYMANS





AVERTISSEMENTS

La plongée est une activité à risque. Elle ne peut être pratiquée que par des personnes correctement formées, bien entraînées et en bonnes conditions physiques et mentales. Le non-respect des règles peut conduire à des blessures graves, des invalidités permanentes ou à la mort. Il vous incombe personnellement d'en évaluer les risques. Ne comptez pas sur les données de cet ouvrage pour garantir votre sécurité. Avant d'entrer dans l'eau, vous devez exercer votre propre jugement quant aux dangers et difficultés que vous allez rencontrer. A vous de faire une évaluation réaliste des conditions de plongée, de la difficulté du site et de votre condition physique !

Ce livre ne remplace pas la formation et n'est pas un substitut à un encadrement professionnel.

L'auteur n'assume dès lors aucune responsabilité quant aux données et informations publiées dans cet ouvrage. L'auteur ainsi que l'éditeur ne peuvent encourir aucune responsabilité, légale ou contractuelle, pour les dommages éventuels encourus en raison de l'utilisation de cet ouvrage.

Toute reproduction d'un extrait quelconque de cet ouvrage, par quelque procédé que ce soit, notamment par photocopie, imprimerie, microfilm est interdite sans l'autorisation de l'auteur.

Copyright © Jean-Claude Taymans, tous droits réservés
2 Rue Mouzin – 7390 Wasmuël – Belgique
Jctdive@gmail.com

D\Septembre 2018\Jean-Claude Taymans :
Editeur ISBN 978-2-930747-14-9



TABLEAU DES MISES A JOUR ET MODIFICATIONS.

Version	Date	Remarques
Vers.1.00	Septembre 2018	original
Vers 1.01	Février 2024	Mise à jour e-mail, suppression ref ADIP

1. INTRODUCTION	6
1.1 Définition	6
1.2. Pourquoi plonger dans une mer à courant ?	6
2. LES RISQUES PARTICULIERS et le « WHAT IF »	6
2.1. Le What if.	7
3. La législation.	7
4. LES COURANTS.	8
4.1. Courants océaniques.	8
4.1.1. Les principaux courants océaniques.	8
4.2. Les courants gravitationnels ou courants de marée.	9
4.3. Les courants radiationnels.	9
4.3.1. Courant du au vent.	9
4.3.2. Courant du à la houle.	9
4.3.3. Les seiches ou Storm surge.	10
4.4. Facteur influençant le courant.	10
4.4.1. Variation du courant en fonction de la profondeur.	10
4.4.2. Courant dans une variation de section.	11
4.4.3. Courant autour d'un obstacle	11
4.4.4. Courant au-dessus d'un récif	12
4.4.5. Variation de section dans un chenal soumis au courant de marée.	12
4.4.6. Courant dans un cul-de-sac	12
5. La marée, un phénomène complexe !	13
5.1. Force et potentiel générateur de la marée	13
5.1.1. Expression mathématique du potentiel de la force de la marée.	14
5.2. Evolution de la théorie des marées.	15
5.2.1. La marée statique ou marée d'équilibre	15
5.2.2. La marée dynamique	15
5.2.3. La formulation harmonique.	16
5.3. Le « Tide Predictor »	17
5.3.1. Classification des ondes	18
5.4. Les types de marées	18
5.5. Influence de la position des astres sur les marées	19
5.5.1. Syzygies, quadrature, vives eaux, mortes eaux	20
5.5.2. Equinoxes et solstices.	20
5.6. Facteurs influençant la marée.	21
5.7. Le coefficient de marée	21
5.7.1. Valeurs des coefficients de marée.	22
5.7.2. Expression mathématique du coefficient de marée.	22



5.8. La résonance	22
5.8.1. Les Lemmes de Harris	22
5.8.2. Période d'oscillation propre d'un bassin rectangulaire.	23
5.9. La marée au large, dans les estuaires et dans les fleuves	23
5.9.1. La marée au large.	23
5.9.2. La marée dans les estuaires et les fleuves.	23
5.10. Lexique des marées.	24
5.11. Marnages exceptionnels.	25
6. Détermination du moment de mise à l'eau.	26
6.1. Les outils.	26
6.1.1 Les annuaires des marées	26
6.1.2. Les cartes de marine	28
6.1.3. Les atlas des courants.	28
6.2. Précautions à prendre pour utiliser les annuaires et atlas des courants	30
6.3. Interpolation de la valeur du courant.	30
6.4. La règle des sixièmes	31
6.5. Détermination de la variation du courant et du courant minimum	31
6.5.1. Détermination de la variation du courant.	31
6.5.2. Critique objective de la méthode.	33
6.5.3. Détermination des paramètres de la plongée.	33
6.5.4. Pondération du calcul théorique.	35
7. EQUIPEMENT SPECIFIQUE	36
7.1. Equipement collectif	36
7.1.1. Bout de courant.	36
7.2. L'équipement individuel	36
7.2.1 Signalisation de surface.	36
7.2.2. Outils tranchants.	37
7.2.3 Outil de stabilisation - Reef hook	37
7.2.4. La Dragonne (Jon Line)	37
8. Configuration de l'équipement.	38
9. LES TECHNIQUES	38
9.1. Préparation de la plongée	38
9.2. La plongée	39
9.2.1. Préparation de la mise à l'eau.	39
9.2.2. La mise à l'eau.	39
9.2.3. La descente	40
9.2.4. L'évolution	40
9.2.5. La remontée	40
9.2.6. La sortie de l'eau.	41
10. Notions d'analyse des risques.	42
10.1. Généralités	42
10.2. Etapes de l'analyse des risques	42
10.3. Définitions	43



10.4 Méthode Kinney	43
10.4.1. Tableaux des facteurs G, E et P	44
10.4.2. Tableaux de l'évaluation du « Risque » (R_k)	44
10.4.3. Analyse de risque	45
11. Bibliographie	46

Non libre de droit



1. INTRODUCTION

1.1 Définition

Une « mer à courant » est une mer soumise au courant gravitationnel ou courant de marée tel que :

- Le marnage doit être égal ou supérieur à 1m ;
- Le courant à mi- marée doit être égal ou supérieur à 0,8 nœuds ;
- Les plongées dans les estuaires, les deltas soumis aux courants engendrés par la marée sont considérés comme « mer à courant ».

1.2. Pourquoi plonger dans une mer à courant ?

Les motivations peuvent être aussi multiples que variés :

- La curiosité naturelle ainsi que l'envie d'expérimenter de nouvelles techniques de plongée ;
- La richesse de la faune et de la flore. Les mers à courants sont généralement riches en plancton. Plancton qui est un des premiers maillons de la chaîne alimentaire.

2. LES RISQUES PARTICULIERS ET LE « WHAT IF »

Il est impératif de tenir compte de certains risques particuliers Lorsqu'on plonge dans une mer à courant :

- Le courant : il peut être votre allié comme votre ennemi. Si vous voulez nager à contre-courant, il y a un sérieux risque d'essoufflement, de crampe, de fatigue et une augmentation du stress. Dans certains cas : le courant de marées peut vous ramener à votre point de départ.
- Filets, nasses, fils de pêche représentent des dangers qui peuvent s'avérer mortel, le courant peut vous y entraîner. La plus grande prudence s'impose. Il faut disposer de plusieurs outils tranchants tel que cisailles, coupe-fils... Les couteaux de plongée traditionnel, sont inefficace contre les filets et fils. Leur caractéristique principale est de ne pas trancher !
- La perte du compagnon de plongée : Ce n'est pas dramatique, mais ennuyeux et potentiellement stressant. Dans une mer à courant, il n'est pas toujours facile de retrouver le compagnon de plongée même en surface. Il faut tout mettre en œuvre pour ne pas le perdre. Ce qui implique d'utiliser le cas échéant une dragonne (Jon Line). En cas de perte procéder comme suit :
 1. Regarder autour de vous pour le retrouver. Ne pas oublier que vous êtes dans un monde en 3D, donc il faut regarder autour, en bas et en haut.
 2. Si au bout de 3 minutes vous ne l'avez retrouvé, entamer la procédure de remontée en utilisant votre parachute de palier. De cette manière vous serez plus visible pour votre compagnon de plongée et par le bateau.
 3. Attendez en surface le bateau qui vient vous récupérer ou rejoignez le bord.
- Etre perdu en mer : C'est potentiellement le danger le plus grave, si l'attente en surface se prolonge, les risques de déshydratation et d'hypothermie, même dans les eaux tropicales ne sont pas négligeables. Pour ne pas perdre et/ou les retrouver plus facilement les plongeurs perdus, quelques règles sont essentielles :

1. Connaitre parfaitement le courant : direction, force...



La plongé en mer à courant

2. Plonger au moment où les courants sont les plus faibles.
 3. Chaque plongeur doit être en possession :
 - a. D'un parachute avec dévidoir ;
 - b. Un kit de repérage : lampe, cyalume, miroir, sea marschall...
- Lorsqu'on plonge du bord le courant peut rendre la sortie de l'eau difficile surtout si le point de sortie est le même que le point d'entrée. Pour éviter certains désagréments il convient :
 1. Reconnaître le parcours avant la plongée.
 2. De plonger aux moments des renverses.
 3. Prévoir des points de sortie de secours.

2.1. Le What if.

Littéralement « What if » signifie : que faire au cas où ? En fait il s'agit d'une analyse de risque, la plongée ne peut se faire que si chacune des questions a reçu une réponse positive. Cette analyse doit se faire à chaque plongée, en fonction du site, des conditions.... Pour les « mers à courant » on peut ajouter les points suivants à la liste des risques¹ :

- Que faire et de quel matériel doit je disposer si le courant m'éloigne du bateau et que je ne peux pas le rejoindre par mes propres moyens ?
- Si je plonge du bord, le courant peut-il me ramener à mon point d'entrée ?
- Si je plonge du bord, dois-je prévoir des points de sorties alternatifs ?
- Quelle conduite doit-on tenir si on a fait une erreur dans l'évaluation des courants et/ou du moment de mise à l'eau ?

3. LA LÉGISLATION.

RENSEIGNER VOUS TOUJOURS SUR LA LEGISLATION LOCALE EN VIGUEUR AVANT DE PLONGER.

Certains pays (Grenada...) exigent d'avoir en permanence une bouée en surface qui indique la position du plongeur.

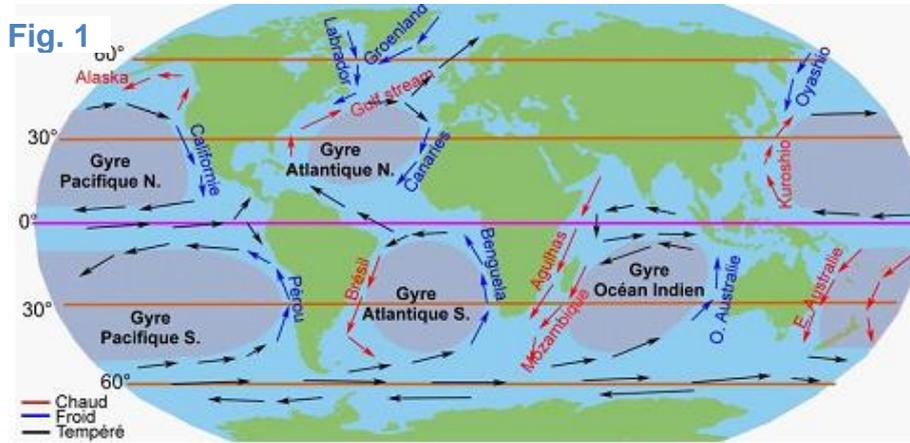
¹ Liste non exhaustive



4. LES COURANTS.

Les courants peuvent avoir des origines diverses, on distingue les courants océaniques, les courants gravitationnels (courant de marée) et les courants radiationnels locaux qui sont dus à des influences extérieures comme le vent, la houle ou la pente.

4.1. Courants océaniques.



Ce sont des courants très importants, qui déplacent des quantités d'eau considérables au travers des océans. Les courants de surface et les courants de fond, ont des origines totalement différentes. Les courants surface sont dus au vent, ils tournent dans le sens horlogique dans l'hémisphère nord et le contraire

l'hémisphère sud. La force de Coriolis induit une déviation angulaire par rapport au vent générateur du courant. Cette déviation est quasi nulle à l'équateur ou les changements saisonniers du courant sont particulièrement sensibles. Les courants profonds sont induits par des variations de température et de salinité qui modifie la densité de l'eau. Cette circulation dans les bassins océaniques est qualifiée de « tapis roulant ». Les zones où le courant profond remontent vers la surface sont nommées « upwellings ». La force de Coriolis induit les gyres océaniques, qui sont de gigantesques tourbillons formés d'un ensemble de courants. Pour des raisons de facilité, le flux des courants océaniques est souvent exprimé en Sverdrup² (S ou Sv) un Sverdrup équivaut à un million de m³/s (0,001 km³/s).

4.1.1. Les principaux courants océaniques.

Océan	Nom du courant	Température	Flux (Sv)
Atlantique Nord	Gulf Stream	Chaud	25
	Courant des Guyanes	Chaud	10
	Courant des Canaries	Froid	3
	Courant du Labrador	Froid	7,5
	Courant du Groenland	Froid	2 à 32
Pacifique Nord	Kuroshio	Chaud	27
	Courant Nord- Equatorial	Chaud	40 à 50
	Courant de Californie	Froid	11
Pacifique Sud	Courant Sud - Equatorial	Chaud	30
	Courant du Brésil	Chaud	20
	Courant du Pérou	Froid	10 à 20
	Courant Circum arctique	Froid	125
Océan Indien	Courant du Mozambique	Chaud	70
	Courant de Somalie	Chaud	37
	Courant des aiguilles	Chaud	20

² Harald Ulrik Sverdrup (1888-1957) océanographe et météorologiste norvégien



4.2. Les courants gravitationnels ou courants de marée.

Il existe une liaison directe entre la force du courant et la variation de niveau de la mer engendrée par les marées. L'eau étant incompressible, la continuité du fluide marin impose que les oscillations verticales correspondant à la marée soient accompagnées de mouvements horizontaux dans l'entièreté de la masse d'eau. Ce sont les courants engendrés par la marée. De même la direction et le sens du courant sont conditionnés par le déplacement de l'onde de marée et la force de Coriolis due à la rotation de la terre.

Le moment où le courant est minimum est proche des étales, mais il n'est pas obligatoirement nul. Dans les estuaires, c'est même rarement le cas. Les courants de marée peuvent avoir un régime giratoire ou alternatif. En régime giratoire, le courant prend successivement des directions et des vitesses pouvant varier dans des limites importantes. A proximité des côtes et dans les estuaires le régime giratoire peut se transformer en régime alternatif. Il n'est pas évident d'estimer la force du courant par calcul car d'une part la marée est un phénomène complexe et d'autre part, le courant est influencé par la topographie des fonds marins ainsi que des côtes. La « méthode des sixièmes » permet d'approcher les variations du courant en fonction de la marée, pour des marées semi-diurnes. Une manière plus précise consiste à utiliser les « Atlas des courants », qui donnent sous forme de cartes les variations en force, en direction et en sens du courant. Certaines cartes de marine, reprennent d'une manière synthétique ces informations.

4.3. Les courants radiationnels.

Les courants radiationnels trouvent leurs origines dans des phénomènes météorologiques ou climatiques locaux. Ils sont peu prévisibles et totalement indépendants du courant de marée ; néanmoins ils peuvent se cumuler à ceux-ci.

4.3.1. Courant du au vent.

Les vents violents en provoquent de la houle, mais aussi des courants car des masses d'eau se déplacent sous l'effet du vent. Le vide laissé par ces masses doit être comblé pour maintenir l'équilibre du système marin. Il y aura donc génération d'un courant pour remplacer ces masses.

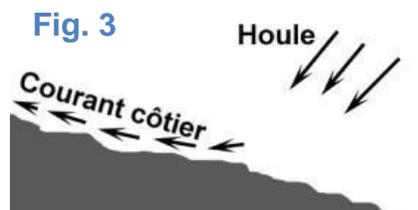
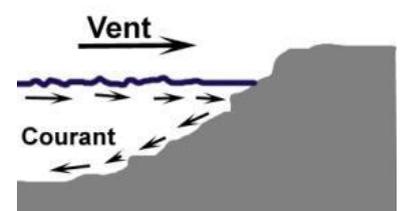
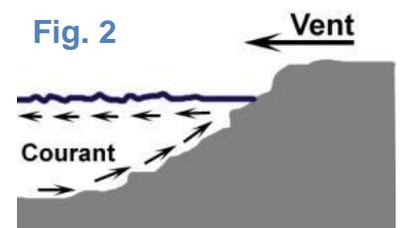
Si le vent vient de la terre, il y aura un courant remontant du fond jusqu'à la surface. Ce courant va par la suite se diriger vers le large. Si le vent vient de la mer, le courant de surface va aller vers la côte puis descendre vers le fond.

4.3.2. Courant du à la houle.

La houle provoque deux types de courant, le courant côtier et le courant d'arrachement. Le courant d'arrachement est bien plus préoccupant pour le plongeur que le courant côtier. En effet, le courant d'arrachement peut entraîner le plongeur vers le large.

4.3.2.1. Courant côtier.

La houle, en attaquant la côte obliquement, met en mouvement des masses d'eau, qui vont engendrer un courant le long du rivage. Ce type de courant est appelé « courant côtier ».





4.3.2.2. Courant d'arrachement.

Le courant d'arrachement apparaît lorsqu'une partie importante de la masse d'eau apportée par la houle est refoulée dans un canal étroit. Ce type de courant peut être particulièrement puissant. Pour échapper à ce courant, il n'y a qu'une solution : il faut contourner les obstacles qui le génèrent, ce qui peut être problématique s'ils sont importants. Ce type de courant se produit lorsque la houle attaque perpendiculairement deux bancs de sable proches l'un de l'autre. Le courant d'arrachement se produira entre les bancs de sable.

Fig. 4

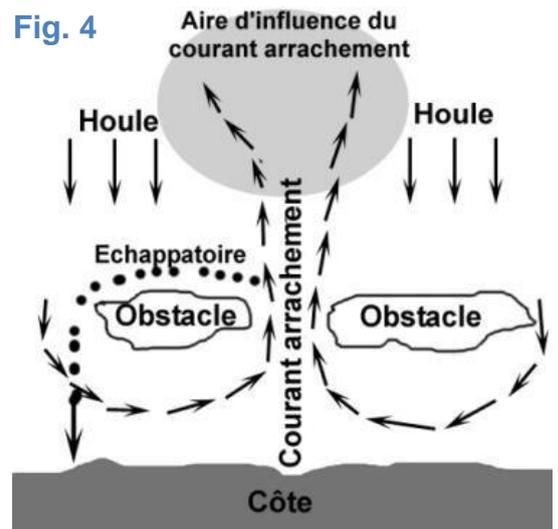
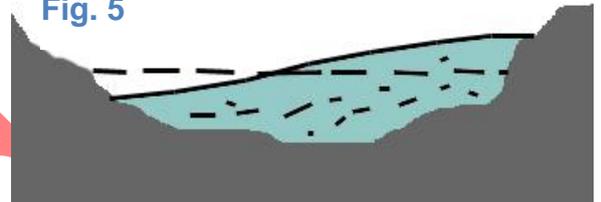


Fig. 5



4.3.3. Les seiches ou Storm surge.

Les seiches sont des petites oscillations de courte période. Elles se produisent le plus souvent, dans les bassins fermés ou partiellement fermés comme les rades, ports, baies. L'amortissement de l'onde est généralement faible, ce qui signifie que ce phénomène peut se perpétuer longtemps après la sollicitation initiale qui l'a engendré. La résonance peut en amplifier les effets. L'origine de la seiche se trouve dans un basculement d'une importante masse d'eau sous les effets du vent, ou d'une baisse de la pression barométrique importante et rapide. Les deux effets peuvent se combiner. Après cette impulsion, le plan d'eau oscille à sa période fondamentale. En dehors d'une brusque montée du niveau de l'eau, elles peuvent engendrer indirectement houle et courant.

4.4. Facteur influençant le courant.

De nombreux facteurs liés notamment à la topographie peuvent influencer la force et/ou la direction des courants.

4.4.1. Variation du courant en fonction de la profondeur.

Le courant varie en fonction de la profondeur suivant une loi parabolique. A cause des frottements le courant est moins important lorsqu'on est proche du fond. Les services hydrographiques ont édité plusieurs formules empiriques pour estimer cette variation de courant. Ils ont donné comme condition initiale la vitesse moyenne ou la vitesse à un mètre du fond. La formulation avec comme condition initiale la vitesse à un mètre du fond est la plus facile pour les plongeurs. En effet elle relie directement la position du plongeur avec le courant de surface. Le coefficient parabolique (m) dépend de la nature du fond, pour un fond sableux, il est de l'ordre de 0,19.

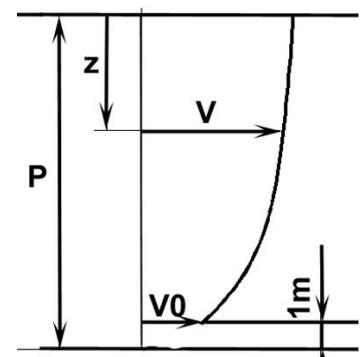


Fig. 6



$$V = V_0(P - z)^m \quad V_0 = \frac{V}{(P-z)^m}$$

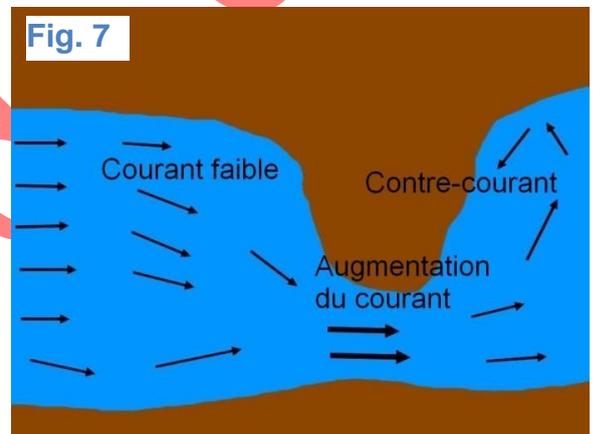
Avec :

- Vo : courant à 1m du fond (m/s)
- V : courant à la profondeur « z » (m/s)
- P : profondeur totale (m)
- m : coefficient parabolique
- z : profondeur

En pratique, cela signifie que si dans un groupe de plongeurs, les différentes palanquées évoluent à des profondeurs différentes : elles ont toutes les chances de se disperser et rendre la récupération des plongeurs plus difficile. Dans la mesure du possible, il faut donc que toutes les palanquées évoluent dans la même zone de profondeur.

4.4.2. Courant dans une variation de section.

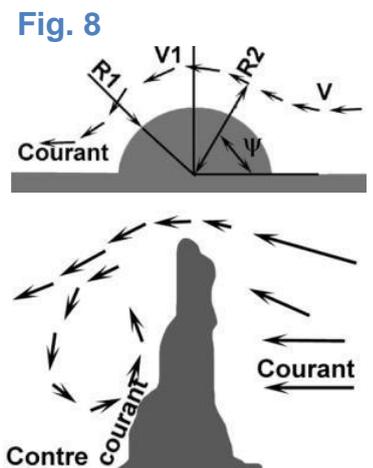
Lorsque la section de passage varie brutalement, il y a localement une brutale variation dans le courant. Cette variation de la section de passage peut être due à la configuration des berges et à la présence de bancs de sable... La mécanique des fluides nous apprend que pour un fluide non compressible, il doit y avoir constance de débit volumique à un instant donné. Lorsque la section de passage diminue, il y a un effet de venturi et le courant augmente brutalement pour maintenir la constance du débit. Dans le cas contraire, le courant diminue. Lorsque l'on se rapproche d'un cul-de-sac le courant diminue mais la hauteur de



l'eau va augmenter, suivant le principe de la conservation de l'énergie édicté par Bernoulli. L'énergie cinétique, énergie liée au courant, va se transformer en énergie potentielle, énergie liée à la hauteur d'eau.

4.4.3. Courant autour d'un obstacle

Les obstacles peuvent se modéliser de deux manières : soit ils ont une forme plutôt arrondie comme une courbe dans une digue ; soit ils ont une forme plutôt en pointe comme les brise-lames ou les jetées. Le courant autour de ces obstacles va se comporter de manière totalement différente dans les deux cas. Le courant autour d'une forme arrondie sera du type laminaire, il va contourner l'obstacle en respectant la forme de celui-ci. Il va subir autour de l'obstacle une augmentation de vitesse. Il en va tout autrement lorsque l'obstacle est en forme de pointe, dans ce cas le régime est turbulent. Le courant ne suit plus la forme de l'obstacle et il peut même se produire en aval de l'obstacle des contre-courants giratoires.





Courant autour d'un obstacle « arrondi »

$$V_1 = V \left(R_2 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \sin \Psi$$

Avec :

V : courant à l'amont de l'obstacle (m/s)

V₁ : courant au point de coordonnée angulaire (R₂, ψ) en m/s

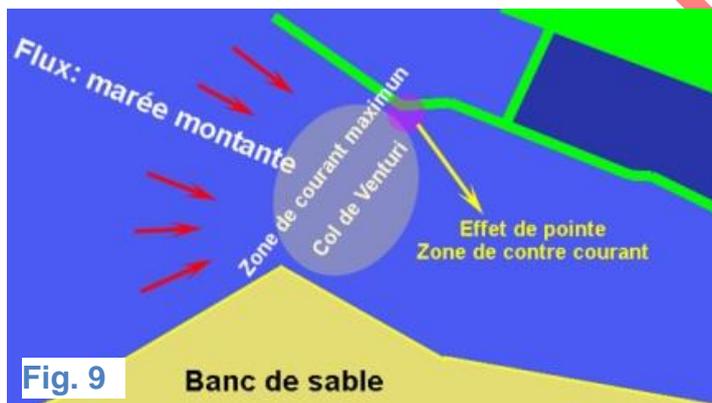
R₁ : rayon de l'obstacle (m)

(R₂, Ψ) : Coordonnées angulaires (m , degrés)

4.4.4. Courant au-dessus d'un récif

Le récif peut être considéré comme un obstacle particulier. Le courant vient butter contre le récif et n'a d'autre solution que de remonter le long de celui-ci et de passer par-dessus avant de continuer sa route. Il va se renforcer au sommet du récif d'une manière conséquente.

4.4.5. Variation de section dans un chenal soumis au courant de marée.



Lorsque la section de passage varie brutalement, il y a localement une brutale variation dans le courant. Cette variation de la section de passage peut être due à la configuration des berges et à la présence de bancs de sable. La mécanique des fluides nous apprend que pour un fluide non compressible, il doit y avoir constance de débit volumique à un instant donné. Lorsque la section de passage diminue, il y a un effet de venturi et le courant augmente brutalement pour

maintenir la constance du débit. Dans le cas contraire, le courant diminue.

4.4.6. Courant dans un cul-de-sac



Lorsque l'on se rapproche d'un cul-de-sac le courant diminue mais la hauteur de l'eau va augmenter, suivant le principe de la conservation de l'énergie édicté par Bernoulli. L'énergie cinétique, énergie liée au courant, va se transformer en énergie potentielle, énergie liée à la hauteur d'eau.



5. LA MARÉE, UN PHÉNOMÈNE COMPLEXE !

C'est la variation périodique du niveau de la mer causé par les forces de gravitation entre les astres. Dès l'antiquité, le phénomène de marée est constaté par Hérodote, Pythéas, Platon et Alexandre le grand. Au 3^e siècle avant J.-C., Antigone de Caryste et Ératosthène relient le phénomène à la position de la lune. Au 1^{er} siècle avant J.-C., Posidonios de Cadix évalue correctement la liaison entre le passage de la lune et la variation de niveau de la mer. Durant des siècles, de nombreux savants : Kepler, Copernic, Galilée et Descartes tentèrent de trouver une explication au phénomène de la marée ; sans réellement apporter d'éléments probants. Il faudra attendre 1687 et la publication de la théorie de Newton sur la gravitation universelle pour avoir la première explication scientifique. La théorie de Newton est incomplète car elle ne tient pas compte des principes de la mécanique des fluides, science embryonnaire à cette époque. Il faudra attendre les théories ondulatoire et harmonique de Laplace, Kelvin et Darwin pour développer les premières machines à prédire les marées.

5.1. Force et potentiel générateur de la marée

Considérons une particule d'eau à la surface de la terre. Cette particule est soumise aux forces suivantes:

- Des forces variables dues à l'attraction des corps célestes.
- Des forces variables dues à l'inertie communément appelées forces centrifuges.
- Une force due à l'attraction terrestre.
- Une force due à la rotation terrestre, qui va dévier la propagation de l'onde de marée.

La force d'attraction (F_d) de l'astre perturbateur, est une force dirigée vers le centre de l'astre perturbateur. Elle a comme point d'application le centre de la particule.

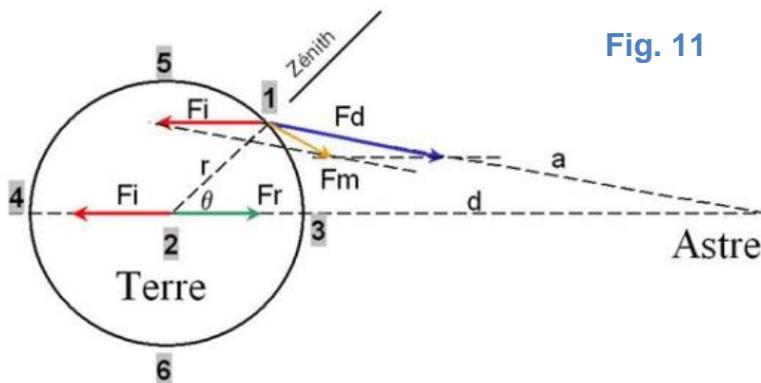


Fig. 11

Si cette force était la seule à agir sur la particule, celle-ci quitterait la terre pour rejoindre l'astre perturbateur. Heureusement pour nous, l'attraction terrestre la retient sur notre petite boule bleue. La Force d'inertie (F_i), est due au mouvement orbital de la terre autour du centre de gravité formé par le système Terre et l'astre perturbateur. A un instant donné,

cette force est constante en grandeur et direction en tout point de notre planète. Elle est égale à la force gravitationnelle (F_r) mais opposée de sens. La force génératrice de la marée (F_m), est égale à la différence des champs de gravitation produits au niveau de la particule au point (1) et au point (2). Elle dérive d'un potentiel lié à la distance entre l'astre perturbateur et la terre. Il n'est pas toujours facile d'utiliser la force génératrice telle quelle, Il est plus facile d'utiliser le potentiel qui génère cette force. Ce potentiel peut être établi en fonction des mouvements des astres perturbateurs. La physique ondulatoire permet d'écrire ce potentiel sous forme d'une somme de potentiels élémentaires qui génèrent des ondes sinusoïdales qui se propagent dans les océans. Les développements successifs de ce potentiel ont permis de mettre au point des prédicteurs de marées de plus en plus précis. Les premiers développements ont été faits par Newton (marée statique) puis par Laplace (marée dynamique) et enfin Kelvin, Adams, Darwin et Dodson qui décomposeront le potentiel en une somme de termes périodiques (analyse harmonique) ou chaque composante correspond à une amplitude et une phase de la marée.



5.1.1. Expression mathématique du potentiel de la force de la marée.

$$V = \frac{1}{2} gr \frac{M}{Me} \left(\frac{r}{d}\right)^3 (3 \cos^2 \theta + 1)$$

G = constante de gravitation universelle $6,67428 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Kg}\cdot\text{s}^2$.

M = masse de l'astre perturbateur (kg)

Me = masse de la terre : $5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Fm= force génératrice de la marée (N)

d = distance centre à centre terre/astre perturbateur. (m)

a = distance centre à centre particules/astre perturbateur. (m)

r = rayon de la terre $6,378137 \cdot 10^6 \text{ m}$

g = accélération terrestre= $9,81 \text{ m/s}^2$

θ = distance zénithale géocentrique (radian)

V= potentiel m^2/s^2

Mm = masse Lune : $7,349 \cdot 10^{22} \text{ kg}$

Ms = masse Soleil : $1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Me = masse Terre : $5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

dm= distance Terre/Lune. $3,633 \cdot 10^8$ à $4,055 \cdot 10^8 \text{ m}$

ds= distance Terre/Soleil. $1,471 \cdot 10^{11}$ à $1,521 \cdot 10^{11} \text{ m}$

ψ_L et ψ_S = coefficient sans dimension

On peut écrire les relations suivantes pour une particule de masse élémentaire (1 kg)

$$Fd = \frac{GM}{a^2} \quad Fi = \frac{GM}{d^2}$$

$$Fm = gM \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{d^2} \right) = g \frac{M}{Me} \frac{r^3}{d^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}$$

5.1.1.4. Comparaison entre les Influences de la lune et du soleil.

A l'aide des relations établies ci-dessus il est possible de déterminer les importances relatives des divers astres engendrant les forces de la marée. En pratique on ne tient compte que de la lune et du soleil.

En posant :

$$\psi_L = \frac{Mm}{Me} \frac{r^3}{dm^3} = 5,6 \cdot 10^{-8} \quad \text{et} \quad \psi_S = \frac{Ms}{Me} \frac{r^3}{ds^3} = 2,6 \cdot 10^{-8}$$

$$\text{Il vient que } \frac{\psi_L}{\psi_S} = 2,15$$

Ce qui signifie que l'action de la Lune est 2,15 fois plus importante que celle du soleil.



5.2. Evolution de la théorie des marées.

Au cours de l'histoire les hommes ont tenté de prédire les marées. Mais il a fallu attendre les progrès de la mécanique des fluides pour obtenir des résultats probants. La formulation harmonique a permis de fabriquer les premières machines à prédire les marées.

5.2.1. La marée statique ou marée d'équilibre

Si l'océan était en équilibre avec la force génératrice de la marée, sa surface prendrait la forme d'un ellipsoïde de révolution dont le grand axe serait dirigé vers l'astre. Cette théorie est basée sur l'hypothèse d'une Terre sphérique, indéformable, recouverte d'une couche d'eau n'ayant ni inertie, ni viscosité, ni continents. Dans cette hypothèse, les océans sont censés répondre instantanément à toutes les forces génératrices de la marée et acquérir instantanément une position d'équilibre. Dans ce modèle établi par Newton, il n'est absolument pas tenu compte du mouvement des particules d'eau. Les hypothèses de la marée statique sont trop simplificatrices, ce qui explique l'échec de cette théorie dans la prédiction des marées. La marée est un phénomène dynamique.

5.2.2. La marée dynamique

En 1775, Laplace publie la théorie dynamique des marées. Elle est dite dynamique car contrairement à la théorie statique, elle tient compte du mouvement des particules liquides. Laplace établit une relation entre les variations du niveau des océans, les angles horaires, les déclinaisons et les distances aux astres perturbateurs. La rotation terrestre implique que pour suivre l'astre perturbateur le bourrelet d'eau va devoir se déplacer par rapport aux fonds marins. Les particules d'eau sont soumises à deux mouvements :

- Un mouvement vertical constitué par la marée.
- Un mouvement horizontal constitué par le courant de marée.

Les bassins océaniques étant fermés, il va s'y créer des phénomènes de réflexion d'ondes stationnaires et des phénomènes de résonance quand les périodes d'oscillations des bassins océaniques et les périodes des marées astronomiques seront en phase. Ces phénomènes de résonances vont amplifier la hauteur d'eau. La réponse des océans à l'excitation de la force génératrice prend la forme d'ondes qui se propagent sur toute la surface maritime. Ces ondes se déplacent plus ou moins rapidement en fonction de la profondeur des océans.

Laplace démontre que la marée réelle est proportionnelle à la marée théorique, définie par la théorie statique, mais déphasée par rapport à celle-ci. Il est donc possible d'utiliser les relations déterminées par la théorie statique, mais en les affectant d'un coefficient de proportionnalité et d'un déphasage. Ces coefficients sont fonction du lieu, ils sont dépendants des fonds marins et des formes de la côte. Ils devront être déterminés expérimentalement pour chaque port. Cette théorie s'appuie sur deux principes fondamentaux de la mécanique rationnelle à savoir le principe des oscillations forcées (résonance) et le principe de la superposition des petits mouvements.

C'EST LE MOUVEMENT HORIZONTAL DU LIQUIDE, À LA POURSUITE CONTINUELLE DE SA POSITION D'ÉQUILIBRE, QUI ENGENDRE LE MOUVEMENT OSCILLATOIRE DU NIVEAU, CONSTITUANT LA MARÉE.



5.2.3. La formulation harmonique.

En se basant sur les principes de Laplace, les savants de l'école anglaise développèrent une formule harmonique pour le calcul des marées. Cette formulation est encore d'usage de nos jours. En 1869, le futur lord Kelvin imagine la notion de développement harmonique du potentiel Lune-Soleil, à la demande de la « British Association for the Advancement of Science ». Ce développement mathématique repose sur la décomposition du potentiel de la force génératrice en une somme de termes périodiques. Chaque composante correspond à une amplitude et à une phase de la marée donnée par le développement harmonique. Il conçoit le « Tide Predictor », machine qui peut prédire les marées en sommant mécaniquement les termes périodiques.

En 1883, Adans et Darwin (le second fils de Charles Darwin) établissent un développement pseudo harmonique du potentiel générateur en une fonction sinusoïdale du temps. Pseudo harmonique car il contient des « constantes » lentement variables dans le temps. Ces légères incertitudes seront levées en 1921 par les travaux de Doodson du « Tidal Institute of Liverpool University » qui propose un vrai développement harmonique du potentiel générateur. Ce développement fournit :

- Une somme de termes de périodes voisines d'un demi-jour, représentant le potentiel semi-diurne.
- Une somme de termes de périodes voisines d'un jour représentant le potentiel diurne
- Des termes à longue période (mois, années).
- Des termes de potentiel tiers-diurne et quart-diurne qui sont nommées « ondes supérieures ». Les ondes supérieures sont loin d'être négligeables dans des eaux peu profondes.

La marée totale étant la somme de toutes ces marées élémentaires suivant le principe de la superposition des petits mouvements. Pour chaque terme, les constantes locales d'amplitude et de phase sont déterminées par observation.

5.2.3.1. Expression mathématique de la formulation harmonique.

Ces équations sont à la base de la conception des machines à prédire les marées !

$$h = \sum_1^i H_i \cos(q_i t - \beta_i) \quad \text{et} \quad T_i = \frac{360}{q_i}$$

$$\frac{dh}{dt} = 0 \quad \frac{dh}{dt} = \sum_1^i q_i H_i \cos\left(q_i t - \beta_i - \frac{\pi}{2}\right)$$

Avec :

h= dénivellation de la marée (m)

H_i= amplitude de l'onde (m)

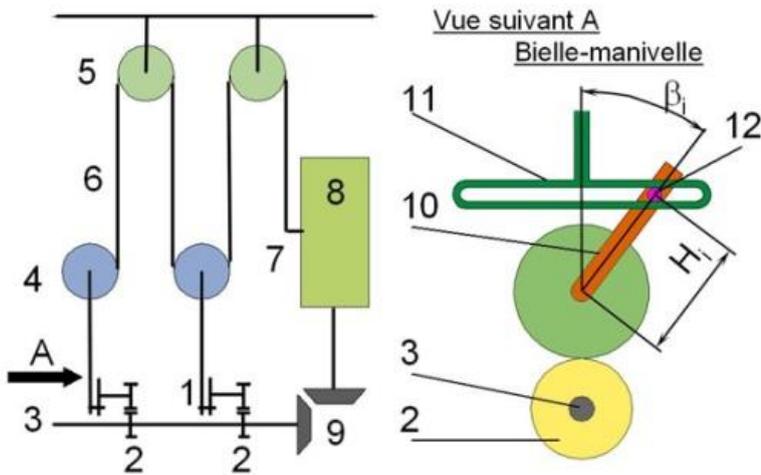
q_i= vitesse angulaire de l'onde (radian/h)

β_i= phase de l'onde à l'instant t (radian)

T_i= période de l'onde (h)



5.3. Le « Tide Predictor »



1. Système bielle-manivelle
2. Commande bielle-manivelle
3. Axe de commande
4. Poulies mobile
5. Poulies fixes
6. Ruban
7. Stilet
8. Tambour rotatif
9. Commande du tambour
10. Manivelle
11. Bielle
12. Maneton

Fig. 12

système bielle-manivelle monté sur un axe commun. La sommation des diverses ondes se fait par un ingénieux système de poulies qui communique l'amplitude totale à un stilet. Le stilet trace sur un cylindre mu en rotation par l'arbre porte bielle-manivelle une courbe qui est l'image, temps pour un port donné, de la variation du marnage par rapport au temps. Pour obtenir avec précision les heures de marée, il est plus commode d'utiliser la courbe dérivée, qui donne immédiatement les maxima et minima sur l'axe des abscisses du tambour. Pour tracer cette courbe, il suffit de changer les réglages de la machine en

déphasant de 90° les réglages originaux. La valeur de l'amplitude n'étant pas le but recherché, son échelle de mesure pouvant être totalement arbitraire.

La plupart des services hydrographiques vont utiliser des machines de ce type jusque dans les années soixante-dix. Par la suite, ce sera le temps des ordinateurs. Vers la fin de cette période, la puissance des ordinateurs va devenir telle qu'il sera possible d'effectuer rapidement les calculs complexes que demande la prédiction des marées. Les méthodes de calcul par éléments finis vont permettre de calculer les marées à l'échelle mondiale. D'autre part, le résultat des calculs sera validé par les mesures altimétriques effectuées par les satellites.





5.3.1. Classification des ondes

Les harmoniques sont regroupées en quatre périodes :

- Semi-diurnes de périodes voisines de 12h ;
- Diurnes de périodes voisines de 24h ;
- Longues périodes : bimensuelle, mensuelle, semestrielle, annuelle... ;
- Supérieures et composées de périodes quart-diurne, tiers-diurne...

Darwin a établi une classification des ondes encore utilisée de nos jours. Chaque onde est désignée par une lettre pour indiquer le groupe auquel elle appartient (M, S, O, N, K, Q, s, r, t, c...) et d'un indice qui indique la période de l'onde.

- Un, deux ... pour les ondes diurnes, semi-diurnes
- f : pour les ondes semi-mensuelles
- m : pour les ondes mensuelles
- a : pour les ondes annuelles

5.3.1.1. Les principales ondes astronomiques.

Darwin	Doodson	Origine	Période	(C ₀)
Semi-diurnes				
M2	255	Lunaire moyenne	12 h 25'	0,45406
S2	273	Solaire moyenne	12 h 00'	0,21143
N2	245	Majeure elliptique	12 h 40'	0,08693
K2	275	Déclinaison luni-solaire	12 h 58'	0,03929
Diurnes				
O1	145	Principale lunaire	25 h 49'	0.18844
K1	165	Déclinaison luni-solaire	23 h 56'	-0,18115
P1	163	Principale solaire	24 h 04'	0,08777
Q1	135	Majeure lunaire elliptique	26 h 52'	0,03608

Le coefficient de Doodson (C₀) indique l'importance relative de l'onde dans le développement harmonique du potentiel (force) de la marée. Le coefficient de Doodson est légèrement différent du coefficient de Darwin, car le développement de Darwin n'est pas 100% harmonique.

5.3.1.2. Les ondes extra- astronomiques.

Ces sont des ondes perturbatrices indépendantes du mouvement des astres. Elles dues à des phénomènes météorologiques (vent...) ou des faibles profondeurs.

5.4. Les types de marées

On distingue 4 types de marée qui sont définies par la comparaison entre les vives eaux diurnes et les vives eaux semi-diurnes. MM Courtier et Van Der Stock définissent le rapport :

$R = (K1 + O1)/(M2 + S2)$ pour classier les types de marées.

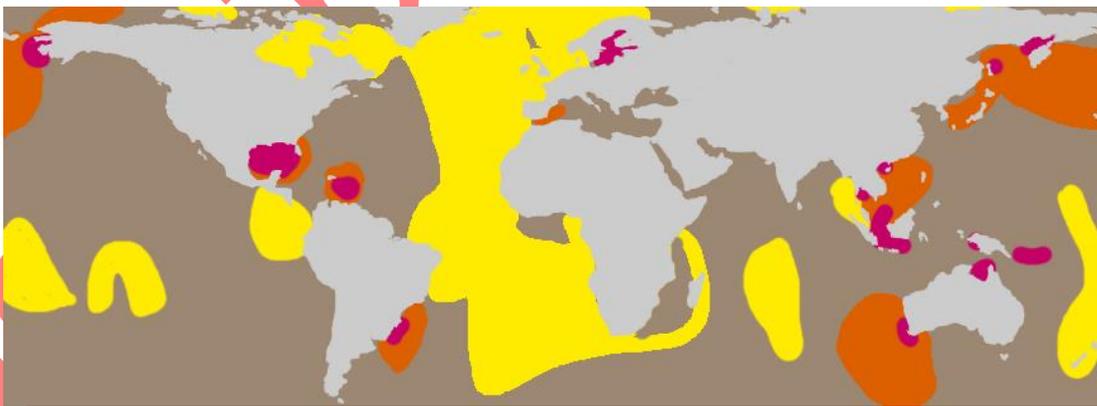
- Marée semi-diurne (jaune) (0<R<0,25): les harmoniques diurnes sont négligeables vis-à-vis des harmoniques semi-diurnes. Il y a deux marées par jour d'importance égale.
 - Atlantique – Europe, Afrique, le long de la côte est des USA
 - Pacifique – le long de la côte du Mexique
 - Océan Indien – vaste zone au centre.



La plongée en mer à courant

- **Marée diurne (violet)** ($R > 3$) : les harmoniques semi-diurnes sont négligeables vis-à-vis des harmoniques diurnes. Il n'y a qu'une marée par jour. Le phénomène est assez rare et ne couvre que des superficies restreintes.
 - Golfe du Mexique.
 - Alaska, Venezuela.
 - Golfe de Botnie (Suède / Finlande).
 - Mer de Java.
 - Mer d'Arafura, le long de la partie australienne.
- **Marée semi-diurne à inégalité diurne (brun)** ($0,25 < R < 1,5$) : les harmoniques diurnes ne sont plus négligeables vis à vis des harmoniques semi-diurnes. Il y a deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les hauteurs de ces marées peuvent être très différentes comme dans l'océan Indien.
 - Pacifique.
 - Océan Indien
 - Partie ouest de l'Atlantique Nord.
 - Arctique, Antarctique
- **Marées mixtes (orange)** ($1,5 < R < 3$) : les harmoniques diurnes prédominent, mais les harmoniques semi-diurnes apparaissent en fonction de la valeur de la déclinaison de la Lune. On a ainsi deux marées par jour lorsque la déclinaison de la lune est nulle. Dans le cas contraire, on n'observe qu'une marée par jour. Ce sont souvent présentes dans les zones de transition entre les marées semi-diurnes avec ou sans inégalité diurne et les marées diurnes.
 - Mer du Japon.
 - Mer de Béring.
 - Mer de Chine Méridionale.
 - Mer de Bismarck et des Salomon.
 - Australie Occidentale.

Fig. 13



5.5. Influence de la position des astres sur les marées

Les positions des astres perturbateurs, ainsi que leurs positions relatives entre eux influent énormément dans la hauteur d'eau observée. Comme le courant est directement lié à cette hauteur et que nos conditions de plongées en dépendent, il est important de pouvoir évaluer rapidement quelles seront les périodes de fort ou faible courant !



La plongée en mer à courant

5.5.1. Syzygies, quadrature, vives eaux, mortes eaux

Comme nous l'avons décrit, la marée est due à la conjonction des effets de deux astres principaux : la Lune et le Soleil. Les actions de ces astres peuvent se cumuler ou se soustraire selon leurs positions relatives par rapport à la Terre. Les variations des hauteurs d'eau seront fonction des phases de la Lune.

- Lorsque la Terre, le Soleil et la Lune sont alignés, les forces génératrices des deux astres générateurs de la marée s'additionnent. L'amplitude sera importante et les courants plus forts. On parle de marée de vives eaux ou de marée de syzygies. Pour plonger en ces périodes, on choisira de préférence les bras fermés du Delta de l'Escaut ou des zones où les courants sont réputés plus faibles.
- Au contraire, lorsque la Terre, le Soleil et la Lune forment un angle droit, les forces génératrices des deux astres ne s'additionnent pas. On parle de marée de quadrature ou de mortes eaux. Pour plonger dans des zones à fort courant, on choisira de préférence ces périodes.

S'il est assez facile de reconnaître dans le ciel la nouvelle Lune ou la pleine Lune il n'en va pas de même pour le premier et le dernier quartier. Il suffit d'observer le croissant et imaginer une ligne passant par les deux pointes. Si on a l'impression de voir un « p », il s'agit du premier quartier. Dans le cas contraire si on a l'impression de voir un « d », il s'agit du premier quartier.

5.5.1.1. Age de la marée.

Les vives eaux et mortes eaux interviennent avec un retard par rapport à la position astronomique des astres générateurs. Ce retard est dû à l'inertie dans le déplacement de la masse d'eau ainsi qu'aux frottements de la couche d'eau sur le fond océanique. Ce retard varie selon les régions entre 2 et 5 jours, en Zélande, il est de l'ordre de 2,5 jours.

5.5.2. Equinoxes et solstices.

A l'approche des équinoxes, c'est-à-dire entre le 19 et le 21 mars ainsi qu'entre le 21 et le 24 septembre, l'amplitude des marées est plus forte. Les variations de dates des équinoxes sont dues à la différence existant entre l'année civile et l'année tropique. Contrairement à la croyance populaire, l'accroissement d'amplitude n'est pas principalement dû au fait que la Terre est proche du Soleil mais au fait que l'attraction du soleil est maximale lorsque celui-ci se trouve dans le plan équatorial. C'est-à-dire lorsque la déclinaison du Soleil est égale à zéro.

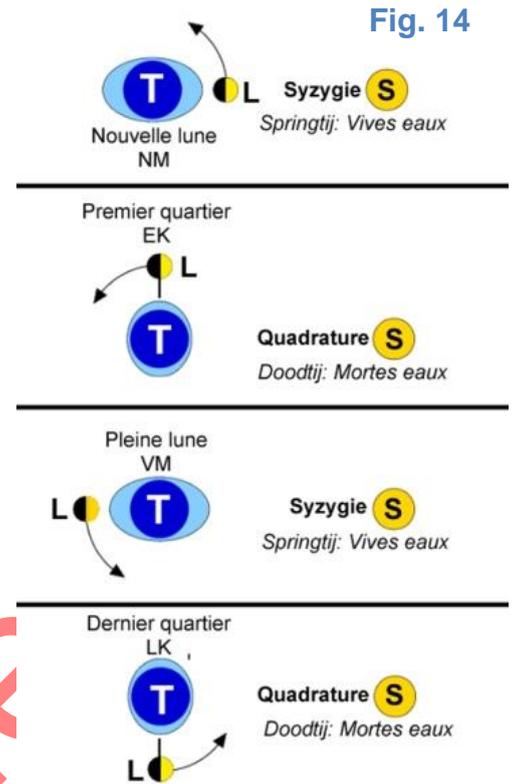


Fig. 14

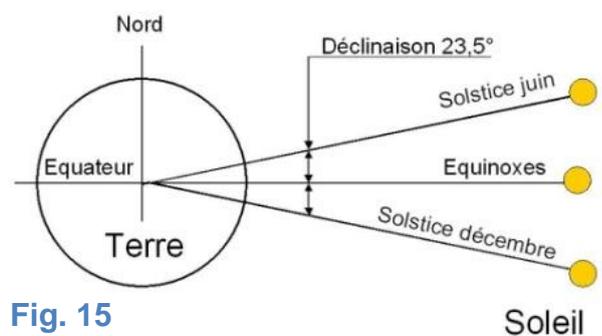


Fig. 15



La plongé en mer à courant

Il n'en va pas de même lors des solstices, la force d'attraction du Soleil est minimale car la déclinaison est maximale (23,5°). La différence de la force génératrice due au Soleil entre l'équinoxe et le solstice est de l'ordre de +/- 8%.

5.6. Facteurs influençant la marée.

Le phénomène de marée est très complexe, il n'est que périodique en apparence. Ce que nous considérons comme constant est loin de l'être à l'échelle de l'univers. Naguère on pensait que les marées étaient rythmées par le saros (6 585,32 jours) car à deux dates séparées d'un nombre entier de saros, la géométrie du système Soleil-Terre-Lune est presque identique. C'est le « presque » qui fait toute la différence, le saros est suffisant pour déterminer les dates des éclipses, mais pas pour estimer la régularité des marées. Dans le calcul réel il faut tenir compte de divers paramètres plus ou moins importants qui vont influencer le potentiel de marée.

Par ordre d'importance sur des courtes périodes :

- La lune ne tourne pas dans le plan équatorial mais sur une orbite inclinée par rapport à l'équateur ;
- La Lune et la terre décrivent des orbites elliptiques ce qui signifie que les distances entre les astres ainsi que les vitesses orbitales varient dans le temps suivant la loi de Kepler. En fait ce qui est constant c'est l'aire balayée par un satellite autour de son astre dans l'unité de temps ;
- L'axe de rotation de la terre n'est pas perpendiculaire à son plan orbital autour du soleil ;
- L'onde de marée est déviée par la force de Coriolis ;
- La terre n'est pas une sphère parfaite et indéformable, elle est aplatie aux pôles.

Sur des périodes plus longue ou largement plus longue :

- La vitesse de rotation de la terre n'est pas constante ;
- La Lune a tendance à s'éloigner de la terre (3 cm/an en moyenne) ;
- L'axe de rotation de la terre oscille (période de 41 000 ans) ;
- Les temps de révolution de la Lune et de la Terre varient très légèrement.

Les bassins peuvent devenir le siège d'oscillations propres ou oscillations libres. Celles-ci dépendent uniquement des formes et dimensions du bassin ainsi que de l'impulsion initiale qui va s'amortir sous les effets du frottement sur les côtes et les fonds océaniques. Chaque océan, mer, baie... possède sa période d'oscillation propre. Lorsque la période de l'onde de marée se rapproche sensiblement de la période d'oscillation propre du bassin, il va se produire un phénomène de résonance. Ce phénomène va amplifier considérablement l'amplitude de la marée.

5.7. Le coefficient de marée

Le coefficient de marée est un nombre sans dimension, compris entre 20 et 120. Sur une longue période, sa valeur moyenne est voisine de 70. Les coefficients entre 75 et 84 sont les plus fréquents (18%). Les marées extrêmes (Coefficient entre 110 et 119) ne représentent que 2%. Ce coefficient est utilisé en France, en Belgique et en Espagne. Ce n'est pas le cas dans les autres pays et notamment Pays-Bas. Ce qui est bien dommage car :

- Cela donne rapidement une bonne estimation de l'importance de la marée.
- Ce coefficient permet d'extrapoler facilement et précisément la valeur du courant à n'importe quel moment pour autant que l'on connaisse la valeur du courant pour les coefficients C=45 et C=95. Ces valeurs sont données dans les atlas des courants.



5.7.1. Valeurs des coefficients de marée.

- Marées extraordinaires de vive-eau aux équinoxes : C=120
- Marées de vive-eau moyenne : C=95
- Marées moyennes : C=70
- Marées de morte-eau moyenne : C= 45
- Marées de morte-eau les plus faibles C=20

5.7.2. Expression mathématique du coefficient de marée.

$$C = \frac{Y_A - Y_B}{U} \times 100$$

Avec :

C= coefficient de marée

U= unité de hauteur qui correspond au demi-marnage d'une marée de vive-eau équinoxiale (m)

YA= Hauteur de la pleine mer au-dessus du niveau de référence (m)

YB= Hauteur du niveau de mi- marée au-dessus du niveau de référence (m)

5.8. La résonance

Comme le son d'une corde d'un instrument est amplifié dans sa caisse, l'amplitude des marées peuvent être amplifié. Ce phénomène est dû à la résonance. Les bassins peuvent devenir le siège d'oscillations propres ou oscillations libres. Celles-ci dépendent uniquement des formes et dimensions du bassin ainsi que de l'impulsion initiale qui va s'amortir sous les effets du frottement sur les côtes et les fonds océaniques. Chaque océan, mer, baie... possède sa période d'oscillation propre. Lorsque la période de l'onde de marée se rapproche sensiblement de la période d'oscillation propre du bassin, il va se produire un phénomène de résonance. Ce phénomène va amplifier considérablement l'amplitude de la marée (effet de seiche).

5.8.1. Les Lemmes de Harris

Rollin A. Harris, dans le « Manual of Tides – 1904 » montre l'importance de la résonance dans l'amplitude des marées. En effet par résonance des petites forces, peuvent par accumulation, produire d'énormes effets.

- Il existe pour un bassin de forme quelconque une ou des périodes d'oscillations propres.
- La période d'oscillation propre d'un bassin en forme de trapèze rectangle est celle d'un rectangle ayant la même surface que le trapèze et la même hauteur.
- Pour un bassin de forme convexe, la période d'oscillation propre est inférieure à la période d'oscillation propre du bassin rectangulaire circonscrit.
- Pour un bassin de forme concave, la période d'oscillation propre est supérieure à la période d'oscillation propre du bassin rectangulaire circonscrit.
- Si un golf ou une baie a une longueur égale au quart de l'onde semi-diurne ou diurne, les amplitudes sont renforcées par la résonance. On parle alors de golfe de longueur critique.



5.8.2. Période d'oscillation propre d'un bassin rectangulaire.

En première approximation si on considère la forme des bassins comme un rectangle ou un trapèze-rectangle ouvert ou semi-ouvert, il est relativement facile de calculer la période d'oscillation propre.

$$T_p = \frac{2L}{\sqrt{gP}}$$

Avec :

g = accélération terrestre = 9,81 m/s²

T_p = période d'oscillation propre d'un bassin (s)

L = longueur du bassin (m)

P = profondeur du bassin (m)

f = fréquence d'oscillation propre f = 1/T_p (s⁻¹)

L'intérêt de cette formule est de montrer que plus le bassin est long et peu profond, plus la période d'oscillation propre est importante et peut se rapprocher des périodes océaniques et générer des marées importants. C'est particulièrement le cas de la baie de Fundy :

L : 275 km ; P moyen : 50m ; marnage : 16-22m

5.9. La marée au large, dans les estuaires et dans les fleuves

5.9.1. La marée au large.

Le mouvement oscillatoire de la surface de la mer est caractérisé par deux séries de courbes. Les lignes d'égale amplitude ou lignes isophase et les lignes cotidales. Ces lignes cotidales sont le lieu géométrique des points où la pleine mer a lieu au même moment. Ces réseaux de courbes donnent une idée de la propagation de la marée. La rotation de la Terre provoque la formation de points nodaux isolés : les points amphidromiques où la marée est nulle. Les lignes cotidales convergent vers ces points. Il y a trois points amphidromiques en mer du Nord. Les trajectoires des particules liquides sont elliptiques et les courants engendrés giratoires. Sous l'action de la force de Coriolis, les particules d'eau tournent autour des points.

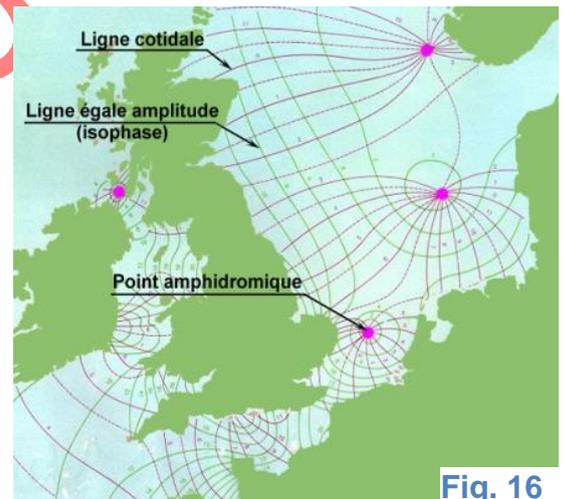


Fig. 16

5.9.2. La marée dans les estuaires et les fleuves.

Les caractéristiques des marées dans les estuaires et les fleuves sont spécifiques aux particularités des fleuves. L'onde de marée à l'embouchure génère une onde dérivée qui va se propager sur des distances considérables. Dans le cas de l'Escaut, les effets de la marée se font ressentir jusqu'à 168 km de l'embouchure, c'est la partie maritime du fleuve. La partie maritime se compose de l'embouchure et de l'estuaire. Si l'embouchure est largement ouverte à la mer, le courant se confond avec le courant généré par la marée du large. L'estuaire est la partie fluviomarine, le courant y est fortement conditionné par la forme des berges et les obstacles. Généralement l'étale de marée haute est plus courte que l'étale de marée basse. Le flot y est plus court que le jusant à cause de la diminution de la vitesse de propagation de l'onde de marée lorsque la profondeur diminue. Cette particularité est plus marquée si le fleuve est peu profond.



5.10. Lexique des marées.

- Âge de la marée : retard entre l'amplitude de la marée et l'action des astres.
- Amplitude : différence entre la hauteur d'une haute ou d'une basse mer et le niveau moyen.
- Basse mer ou marée basse (LW) : niveau le plus bas atteint par la mer au cours du cycle.
- Déclinaison : angle que fait la direction d'un astre avec le plan équatorial.
- Ecliptique : trajectoire apparente du Soleil au cours de l'année. Elle définit le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil.
- Equateur céleste : c'est la projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste.
- Estran : bande côtière comprise entre les niveaux des plus hautes mers des plus basses.
- Etale : temps durant lequel le niveau de la mer reste stationnaire.
- Flot : courant de marée généré par la marée montante.
- Force de Coriolis : force inertielle due au mouvement de rotation de la terre, elle va tendre à dévier toutes particules se mouvant sur la terre.
- Heure de marée : un sixième de l'intervalle.
- Intervalle : durée qui sépare une pleine mer d'une basse mer consécutive.
- Jusant : courant créé par la marée descendante.
- Ligne cotidale : Lieu géométrique des points (courbe) ou la pleine mer à lieu au même moment.
- Lunaison : c'est l'intervalle de temps entre deux nouvelles Lunes. Elle est de 29 jours 12 heures et 44 minutes.
- Marégramme : en un lieu donné c'est le graphique qui représente les variations du niveau de la mer en fonction du temps.
- Marégraphe : instrument qui enregistre les variations du niveau de la mer.
- Marnage : différence de hauteur entre la basse mer et la pleine mer.
- Montant : intervalle de temps entre la basse mer et la pleine mer.
- Morte eau : période durant laquelle le marnage est minimal.
- Pleine mer ou marée haute (HW) : niveau le plus haut atteint par la mer au cours du cycle.
- Perdant : intervalle de temps entre une marée haute et la marée base qui la suit.
- Point amphidromique : point où l'amplitude de la marée est nulle. L'onde de marée tourne autour de ce point, en suivant la loi de Coriolis. Il existe trois points amphidromique en mer du Nord.
- Point vernal : sur la sphère céleste c'est le point d'intersection entre l'équateur céleste et l'écliptique.
- Quadrature : position de la Lune et du Soleil quand leurs directions par rapport à la Terre forment un angle droit.
- Revif : période comprise entre une morte-eau et une vive-eau.
- Seiche : oscillation de courte période du niveau de l'eau qui se superpose à la marée.
- Sphère céleste : c'est une sphère imaginaire de rayon quelconque dont le centre est la Terre.
- Syzygie : position où la Terre, Lune, Soleil sont alignés.
- Type de marée : classification de la marée selon l'importance des composantes diurnes et semi-diurnes.
- Vive eau : période pendant laquelle le marnage est maximum.



5.11. Marnages exceptionnels.

Dans certaines régions du monde, notamment au Canada, les effets combinés de la résonance, de la topographie... peuvent mener à des hauteurs d'eaux tout à fait exceptionnelles.

Par exemple la baie de Fundy combine :

- Un effet de seiche due à la résonance. La période d'oscillation propre de la baie (T_p) est de l'ordre de 13h ce qui est très proche de la période des composantes harmoniques exerçant une forte influence : M2 à une période de 12h25' et S2 une période de 12h00' pour des coefficients de Doodson qui sont respectivement de 0,45406 et 0,21143.
- La baie est en forme de V avec l'entrée nettement plus large que le fond. Ce qui va favoriser l'entrée de l'eau. Et augmenter la hauteur de l'eau.
- Le fond de la baie est en cul de sac étroit. L'énergie cinétique va se transformer en énergie potentielle et donc augmenter la hauteur de l'eau.

Fig. 17



Pays	Région	Marnage
Canada	Baie d'Ungava	20m
	Baie de Fundy	19m
	Baie de Frobisher	16,3m
Argentine	Puerto Gallegos	16,6m
Grande Bretagne	Estuaire de la Severn	16,5m
	Canal de Bristol	15m
France	Baie du Mont-Saint-Michel	15m
Australie	Horizontal Falls	10m



6. DÉTERMINATION DU MOMENT DE MISE À L'EAU.

Déterminer le moment de mise à l'eau est un art subtil. Il combine calcul du courant, pragmatisme et jugement de la part du plongeur. Les méthodes rapides viennent généralement de la navigation maritime. Pour le navigateur, ce qui importe le plus c'est la distance séparant sa quille du fond et pas trop le courant... Un peu plus de moteur et le tour est joué. Pour le plongeur le problème se pose en d'autres termes. Les variations de profondeur n'ont pas vraiment d'importance, mais la connaissance des caractéristiques du courant est fondamentale. Le seul moteur du plongeur : ses jambes ! L'imprécision des méthodes peut jouer des tours préjudiciables aux plongeurs, alors qu'elles sont largement suffisantes pour les navigateurs. Les méthodes sophistiquées passent obligatoirement par le tracé et l'analyse d'une rose des courants en combinaison avec un annuaire des marées. Il ne faut jamais confondre l'étales donné dans le carnet de marée avec le meilleur moment pour commencer la plongée. L'étales ne représente pas toujours le moment où le courant est le plus faible. C'est notamment le cas dans les estuaires. On dispose de plusieurs outils plus ou moins précis pour évaluer les courants et surtout le moment où ils sont les plus faibles. Ces outils sont les cartes de marine, les atlas des courants et les annuaires des marées.

6.1. Les outils.

6.1.1 Les annuaires des marées

Contrairement à la croyance de nombreux plongeurs : le « carnet des marées » ou annuaire des marées ne donne pas les heures de la journée où le courant est minimal. Il donne les étales, c'est-à-dire les heures où le niveau de la mer passe par son point haut ou bas. Il donne aussi la hauteur de l'eau par rapport à un système de référence arbitraire. Ces informations sont établies pour un port de référence. Généralement l'annuaire dispose d'une table de conversion qui permet de trouver les étales pour d'autres zones de la région. Malheureusement les services hydrographiques des divers pays n'utilisent pas les mêmes références. Ci-dessous quelques exemples d'annuaires des marées.

6.1.1.1. Annuaire néerlandais (Zeeland)

Editeur : Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine

Si la plupart des signes, sigles et abréviations utilisés dans le carnet des marées et les cartes de marines peuvent être très clairs pour des néerlandophones (quoique !!) il n'en va pas de même pour beaucoup de francophones. Ce petit lexique vous facilitera la compréhension. Ces carnets sont généralement distribués dans les centres de plongée. Il est tenu compte de l'heure d'été. La plupart des carnets distribués ont Wemeldinge, Vlissingen ou Hoek van Holland comme port de référence. Ils possèdent généralement une table de correction (Herleidingstabel) pour une série d'autres ports. Il a la particularité de ne pas donner la hauteur d'eau suivant le zéro des cartes mais par rapport à un niveau arbitraire le NAP.

Il ne donne pas le coefficient de marée (C), ce qui rend les interpolations pour connaître la valeur du courant plus aléatoire.

JULI 2012					
datum	hoogwater		laagwater		NAP -cm
	h min ZT	NAP +cm	h min ZT	NAP -cm	
16 ma	2.25	142	8.25	136	
	14.50	152	20.55	140	
17 di	3.15	156	9.15	137	
	15.35	162	21.45	147	
18 wo	3.55	169	9.55	138	
	16.15	172	22.22	155	
19 do NM 5.25	4.40	182	10.32	140	
	16.55	180	23.05	161	
20 vr	5.17	192	11.10	141	
	17.32	186	23.40	167	
21 za	5.55	198	11.50	141	
	18.12	186			
22 zo	6.35	198	0.20	171	
	18.47	183	12.30	138	
23 ma	7.12	195	1.00	172	
	19.25	178	13.10	137	
24 di	7.52	190	1.35	173	
	20.02	175	13.50	136	
25 wo	8.35	185	2.15	173	
	20.45	172	14.30	137	
26 do EK 9.57	9.22	178	3.05	171	
	21.35	167	15.20	137	
27 vr	10.15	169	3.55	166	
	22.37	161	16.20	137	
28 za	11.25	159	4.55	157	
	23.55	156	17.25	135	
29 zo	12.37	155	6.05	148	
			18.45	138	
30 ma	1.10	161	7.25	144	
	13.55	160	20.00	149	
31 di	2.27	175	8.35	144	
	15.02	172	21.10	160	

Fig. 18



La plongé en mer à courant

HW: marée haute (Hoogwater)

LW: marée basse (Laagwater)

ZT: heure d'été (Zomer Tijd)

MET: heure d'hiver - (Middel Europese Tijd) (MET=GMT+1)

GMT: Greenwich Mean Time

NM: nouvelle lune (Nieuwe maan)

VM: pleine lune (Volle Maan)

EK: premier quartier de lune (Eerste Kwartier)

LK: dernier quartier de lune (Laatste Kwartier)

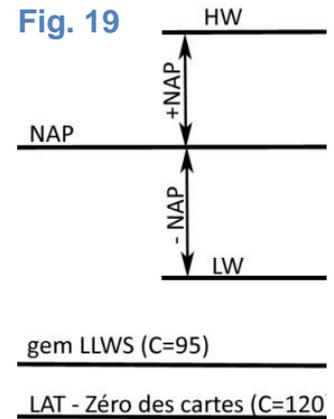
NAP: niveau de référence arbitraire (Normaal Amsterdamse Peil)

LAT :Lowest Astronomical Tide – Zéro des cartes (C=120)

gem. LLWS: niveau moyen des marées basses de vives eaux (Gemiddeld Laag Laag Water Spring). (C=95)

Doodtij: mortes eaux - Springtij: vives eaux (C=45)

Fig. 19



6.1.1.2. Annuaire français

Editeur : Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM)

Calais (France)

Coordonnées : 050° 58' 09.6" N, 001° 52' 03.0" E

Annuaire de marées | Hauteur d'eau heure par heure | Grandes marées

H légale | 20/07/2018

Vendredi 20 juillet 2018				Samedi 21 juillet 2018			
	Heure	Hauteur	Coefficient		Heure	Hauteur	Coefficient
BM	01:25	1.27	---	BM	02:21	1.56	---
PM	06:41	6.55	63	PM	07:44	6.25	53
BM	13:52	1.60	---	BM	14:50	1.86	---
PM	19:07	6.48	57	PM	20:14	6.23	49

Fig. 20

L'annuaire français est un modèle du genre ! Il est simple à utiliser Il donne les heures et les hauteurs des pleines mers (PM) c'est-à-dire la marée haute et des basses mers (BM) c'est-à-dire les marées basses. Les hauteurs sont données par rapport au zéro des cartes. Le zéro des cartes n'est pas

déterminé de la même manière par tous les services hydrographiques. Il donne le coefficient de marée (C), ce qui rend les interpolations pour connaître la valeur du courant plus précises. Les deux tomes de l'annuaire reprennent les données pour 60 ports principaux et 520 ports secondaires en France métropolitaine, outre-mer, Afrique du nord, Afrique de l'ouest, Madagascar et Djibouti.

Le service du SHOM fournis gratuitement un annuaire en ligne sur une période d'un an. (<http://maree.shom.fr/>) cette version reprend en autre 1000 ports dans le monde. Le coefficient (C) n'est donné que pour les ports français.

6.1.1.3. Annuaire canadien

Editeur : Service hydrographique du Canada

Le service hydrographique canadien publie deux tables : la première est une table qui donne l'heure des étales et la seconde donne la valeur du courant au moment des étales.

- La table des marées est une table classique qui donne le moment de l'étales et la hauteur de l'eau pour les pleines et basses mers et ce par rapport au zéro des cartes.
- La table des courants donne la force maximale du courant en nœuds (knots) au moment des étales.



La plongée en mer à courant

6.1.2. Les cartes de marine

Les cartes de marine peuvent également donner des indications sur les courants. Les indications données sont moins précises que celles fournies par les atlas des courants. Les valeurs du courant en nœud (knots) pour les marées de vives et mortes eaux par rapport à un port de référence sont données dans un cartouche. Ce cartouche reprend aussi la direction du courant et la position géographique (longitude et latitude) de la mesure. Position qui est aussi repérée sur la carte par un signe distinctif.

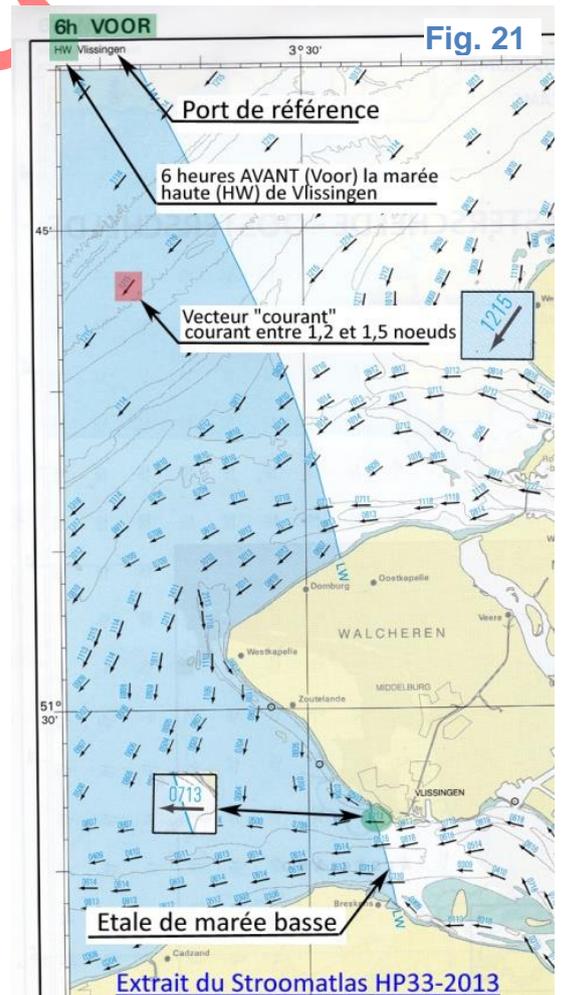
6.1.3. Les atlas des courants.

L'atlas des courants est un ensemble de cartes rapportent à l'aide de vecteurs la direction et la force du courant. Généralement le « moment zéro » est la pleine mer du port de référence. Les cartes reprennent la force et la direction des courants d'heure en heure : 6 heures avant et 6 heures après le « moment zéro ». Dans ce cas des marées semi-diurnes il y a 13 cartes. Le sens des flèches donne la direction du courant. Suivant l'éditeur la taille, la longueur, l'épaisseur et même la couleur des flèches donnent des indications sur la valeur du courant. Certains atlas des courants indiquent un nombre au-dessus des flèches. Les deux premiers chiffres donnent la valeur du courant pour des marées de vives-eaux et les deux derniers pour des marées de mortes-eaux.

6.1.3.1. Atlas des courants néerlandais (HP33)

Editeur : Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine

Les stroomatlas HP33 est des atlas des courants très complet, édité par le « Dienst der Hydrografie » néerlandais. Il comprend un annuaire des marées et les cartes de courant pour l'ensemble des Pays-Bas. Le port de référence est Vlissingen pour le delta de l'Escaut et le « Voor delta ». Le « Voor delta » est la portion de mer du Nord qui se trouve juste en face de l'embouchure de l'Escaut. Pour la mer du Nord, dans son ensemble, le port de référence est Hoek van Holland. La valeur du courant est donnée par quatre chiffres bleus au-dessus du vecteur. Les deux premiers donnent la valeur du courant (x10) en nœuds pour une marée de mortes eaux (C=45). Les deux derniers donnent la valeur du courant (x10) en nœuds pour une marée de vives eaux (C=95). Pour une heure donnée, il est possible de visualiser sur la carte les endroits où l'étale est basse (trait gras bleu marqué LW) ou haute (trait gras bleu marqué LW). Comme le démontre la carte : étale ne signifie pas courant nul : six heures avant la marée haute de Vlissingen, la marée est basse entre Vlissingen et Breskens mais le courant est encore de 0,7 à 1,7 nœuds.





La plongée en mer à courant

6.1.3.2. Atlas des courants français

Editeur : Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM)

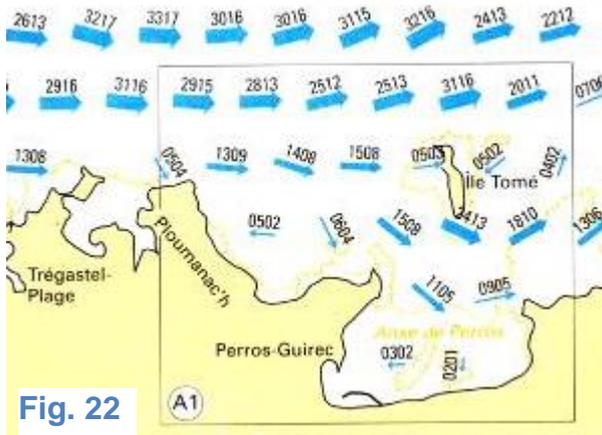


Fig. 22

Dans sa conception, cet atlas est similaire à son homologue néerlandais, sauf que visuellement l'épaisseur des flèches donne une meilleure de l'importance du courant. La valeur du courant est donnée par quatre chiffres noirs au-dessus du vecteur. Les deux premiers donnent la valeur du courant (x10) en nœuds pour une marée de vives eaux (C=95). Les deux derniers donnent la valeur du courant (x10) en nœuds pour une marée de mortes eaux (C=45). Par interpolation il est possible de calculer la

valeur du courant à n'importe quel moment, à condition de connaître le coefficient de marée.

6.1.3.3. Atlas des courants québécois

Editeur : Service hydrographique du Canada

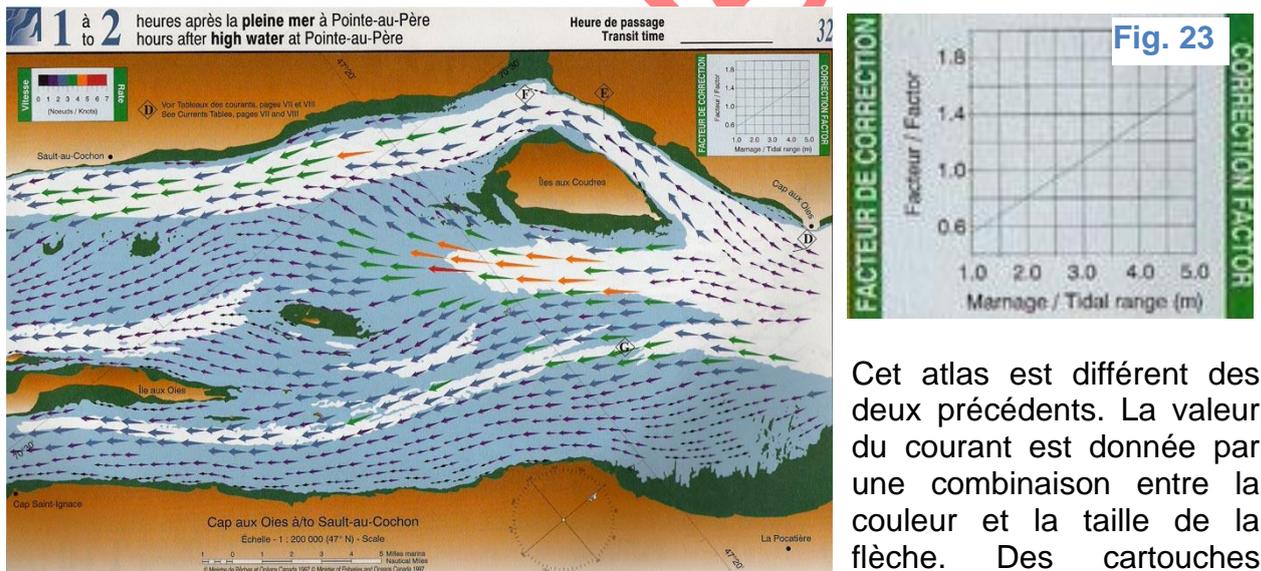


Fig. 23

Fig. 24

Cet atlas est différent des deux précédents. La valeur du courant est donnée par une combinaison entre la couleur et la taille de la flèche. Des cartouches reprennent le code des couleurs utilisé pour donner la valeur des courants ainsi que l'échelle. Sur la carte la longueur de la flèche représente la distance de la dérive pour une heure. Lorsque le courant varie d'une manière importante en une heure, la flèche est remplacée par trois flèches accolées les unes aux autres. Chaque flèche représentant une dérive de 20 minutes. Un abaque permet de déterminer d'une manière précise le courant en fonction du marnage. Marnage qui est donné dans les annuaires des marées.

Par exemple :

On relève sur la carte un courant de 5 nœuds et l'annuaire des marées donne un marnage de 4m. L'abaque donne un coefficient correctif de 1,4. Le courant réel sera donc : $5 \times 1,4 = 7$ nœuds.



6.2. Précautions à prendre pour utiliser les annuaires et atlas des courants

Lorsqu'on utilise un annuaire des marées et/ou un atlas des courants, il arrive d'oublier de vérifier quelques points importants... ce qui peut occasionner quelques désagréments ou pire lors de la plongée !

- Le système horaire utilisé dans l'annuaire des marées correspond-il à l'heure affichée par votre montre (En principe l'heure locale) ?
- Si vous êtes dans une région qui passe à l'heure d'été, votre annuaire des marées en tient-il compte ou pas ?
- Le port de référence indiqué sur l'annuaire des marées est-il suffisamment proche de votre lieu de plongée pour ne pas devoir utiliser une table de conversion ? Il faut toujours utiliser les données les plus proches du point de plongée.
- Votre annuaire des marées a-t'il une table de conversion vers des zones spécifiques en dehors du port de référence, par exemple des ports secondaires ?
- Les ports de références sont-ils identiques si vous utilisez conjointement un annuaire des marées et un atlas des courants ? Le cas échéant, utilisez une table de conversion.
- Pour déterminer le marnage vérifier toujours le référentiel. Ce n'est pas toujours le zéro des cartes ! Certains annuaires donnent les hauteurs d'eau par rapport à un système arbitraire qui est très éloigné du zéro des cartes (Les annuaires des Pays-Bas par exemple).
- Vérifiez toujours les unités utilisées (métrique, impérial...). Généralement les courants sont donnés en nœuds ou un multiple (souvent 10), mais ce n'est pas obligatoirement le cas.
- Ne pas oublier que les directions des courants représentés dans l'atlas des courants ne sont PAS des caps magnétiques.

6.3. Interpolation de la valeur du courant.

Il est possible d'extrapoler les valeurs du courant donnés par les atlas de manière à le connaître précisément heure par heure pour autant que l'on puisse déterminer :

- Le coefficient des marées soit C.
- Le courant lors de vive-eau moyenne (C=95) soit vve
- Le courant lors de morte-eau moyenne (C= 45) soit vme

La valeur du courant (v) s'exprime la par la relation :

$$v = vme + \left(\frac{(C - 45)(vve - vme)}{50} \right)$$

Exemple : Le marquage de la flèche de l'atlas des courants français porte la mention « 3116 ».

L'annuaire des marées indique le coefficient de marées 63

Donc : Vve=3,1 nœuds, Vme=1,6 nœuds et C = 63 et on peut déduire le courant (V).

$$v = 1,6 + \left(\frac{(63 - 45)(3,1 - 1,6)}{50} \right) = 2,14 \text{ noeuds}$$



6.4. La règle des sixièmes

Cette règle permet d'estimer grossièrement le courant engendré par une marée semi-diurne. Pour l'appliquer, il faut obligatoirement connaître le courant maximum et elle implique que :

1. La variation du courant est strictement sinusoïdale, ce qui est loin d'être le cas dans les estuaires ou l'influence de la forme des berges est prépondérant.
2. Le courant est nul aux étales, ce qui n'est pas toujours le cas, notamment dans les estuaires et le long des côtes très découpées.

Règle des sixièmes	Courant
Étale	$V=0$
1 h après l'étales	$1/2 V \text{ max}$
2 h après l'étales	$5/6 V \text{ max}$
3 h après l'étales	$V \text{ max}$
2 h avant l'étales suivante	$5/6 V \text{ max}$
1 h avant l'étales suivante	$1/2 V \text{ max}$
Étales	$V=0$

6.5. Détermination de la variation du courant et du courant minimum

Pour la sécurité en plongée, il est important de connaître la manière dont le courant varie ainsi que le moment où celui-ci est minimum. Cela permet de déterminer le moment où il est judicieux de commencer la plongée et la durée maximale de celle-ci. Cette détermination se fait à l'aide de l'atlas du courant.

6.5.1. Détermination de la variation du courant.

Cette détermination se fait à l'aide de l'atlas des courants. Dans le cas le plus général lorsque le courant est giratoire, on trace la rose des courants. Dans les chenaux et les estuaires ce n'est pas possible étant donné que le courant a, alternativement, deux directions opposées. La rose des courants serait plate et donc il y a impossibilité de voir la variation du courant. Dans ce cas il faut tracer une sinusoïde du courant en tenant compte du sens du courant. Les méthodes proposées présentent les avantages :

- De tenir compte de la spécificité des différents sites.
- D'être directement liée à la vitesse du courant.
- De tenir compte de la position géographique du site.
- De pouvoir facilement intégrer un coefficient correcteur du moment de mise à l'eau en fonction de paramètres locaux. Ces paramètres sont très diversifiés :
 - Courant de circulation autour des pointes.
 - Courant d'arrachement dû à la présence des bancs de sable.
 - Dans un delta, présence proche de plusieurs bras actifs.
 - Onde qui se brise perpendiculairement sur une digue, ce qui engendre la transformation de l'énergie cinétique de l'onde en énergie potentielle et une diminution du courant.
 - Un sens de courant nettement plus dangereux que l'autre.

6.5.1.1. Courant giratoire, méthode de la « Rose de courant »

Cette méthode est parfaitement adaptée pour les marées semi-diurnes lorsque le courant varie permanence en grandeur et direction. La première étape consiste à tracer la « Rose du courant » à partir de l'atlas des courants. La rose de courant est l'hodographe du vecteur courant au cours d'un cycle de marée. Il représente la variation du courant en grandeur, direction en fonction du temps. Il s'obtient, en reliant entre eux

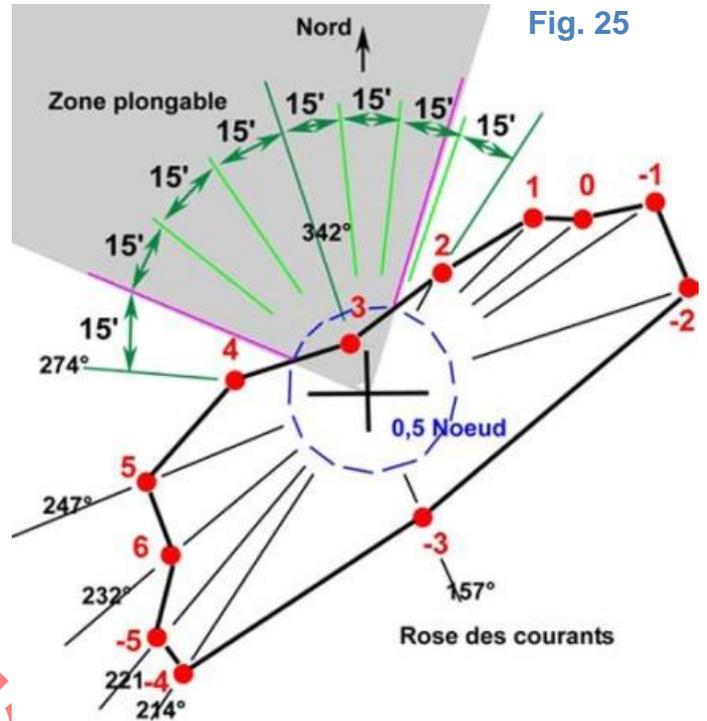


La plongée en mer à courant

les extrémités des vecteurs courants. Sur ce type de graphique, la grandeur du courant est représentée par des cercles concentriques dont le centre est une « rose des vents ». Le cercle tangent à la courbe représente le courant minimum. La direction du courant est donnée par la « rose des vents ».

Méthode de traçage

1. Repérez sur l'atlas des courants le site de plongée.
2. Relevez les valeurs du courant et sa direction sur la flèche la plus proche du site ainsi que les moments par rapport à l'étable de niveau par rapport au port de référence. Au total, il y a treize mesures à relever pour les marées semi-diurnes.
3. A partir du relevé, portez sur le calque des points qui représentent l'extrémité des vecteurs, en ayant soin de noter les heures.
4. Joignez ces points pour obtenir la rose des courants.
5. Tracez sur le graphique, le cercle qui représentant la valeur maximum du courant qu'un plongeur peut supporter en toute sécurité. Cette valeur est de l'ordre de 0,5 à 0,8 nœuds. La zone de l'hodographe à l'intérieur de ce cercle indique la zone plongeable.
6. Déterminez l'heure de mise à l'eau par rapport au port de référence, la durée maximale de la plongée et la variation du courant tout au long de la plongée. La distance consécutive entre deux points représente une heure. Il suffit de diviser ce segment pour se donner une échelle de temps. Cette échelle n'est pas régulière, il faut donc recommencer cette opération d'heure en heure.



6.5.1.2. Courant à sens alternatif – Méthode dite de la « sinusoïde »

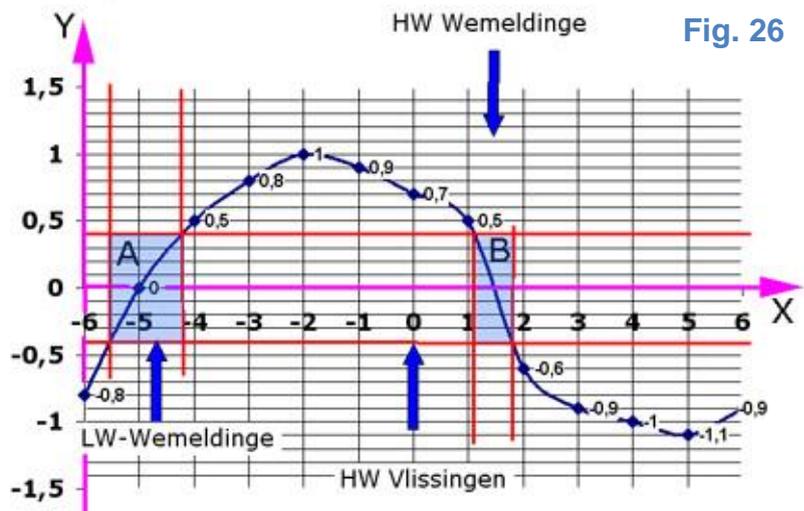
Ce type de courant prend alternativement deux directions diamétralement opposées, avec un bref moment où le courant est nul. C'est ce moment qu'il faut déterminer. La méthode de la rose de courant n'est pas applicable, car invariablement l'hodographe est plat ! Tracé la sinusoïde du courant est une méthode plus précise, qu'une évaluation grossière à l'aide de la règle des sixièmes. Elle consiste à déterminer, à l'aide de l'atlas des courants, le moment où le courant s'inverse. Puis de moduler le temps total de plongée autour de ce moment, pas d'une manière égale mais en fonction de la topographie locale.

Méthode de traçage

L'utilisation d'un tableur (Excel) facilite grandement le calcul, en suivant la méthode expliquée ci-dessous une simple feuille de papier quadrillé peut donner des résultats satisfaisants.



1. Repérez sur l'atlas des courants le site de plongée.
2. Relevez les valeurs du courant sur la flèche la plus proche du site ainsi que les moments par rapport à l'étale de niveau par rapport au port de référence. Au total, il y a treize mesures à relever pour les marées semi-diurnes.
3. Affectez les valeurs trouvées du signe « plus » si l'eau rentre dans l'estuaire et du signe « moins » si l'eau sort de l'estuaire
4. Tracez, avec ces valeurs, un diagramme (X, Y) en plaçant les moments en abscisse (axe des X) et les courants en ordonnée (axe des Y). L'intersection de cette courbe, d'allure sinusoïdale, avec l'axe des « X », donne le moment où le courant nul par rapport à l'étale de marée haute de Vlissingen. Il suffit de moduler la durée de la plongée autour de ces points.
5. Tracez une horizontale à +0,4 et une autre à -0,4, à partir de l'intersection de ces droites avec la courbe de courant, tracez des droites verticales. Les zones ainsi délimitées sur l'axe des X vous déterminent les moments plongeables, pour la facilité de lecture il est conseillé d'hachurer ces zones³.



6.5.2. Critique objective de la méthode.

Les mesures éditées dans les atlas des courants sont faites à faible profondeur. Cela induit une sécurité supplémentaire, le courant au fond étant plus faible que le courant en surface. On estime que le courant de fond vaut entre 0,65 et 0,75 fois le courant donné par les atlas. Les mesures sont effectuées avec une vitesse de vent négligeable. La mécanique des fluides nous apprend que le courant est directement lié à la hauteur d'eau. Dans les chenaux, l'action du vent peut engendrer une surcote de l'ordre de 1 à 2m, ce qui aura une incidence de l'ordre de 10 à 20 % sur le calcul. Si la vitesse du vent reste inférieure à 4 Beaufort, il n'est pas utile de majorer les mesures de l'atlas des courants.

6.5.3. Détermination des paramètres de la plongée.

Les tracés permettent de déterminer avec une bonne précision le meilleur moment pour commencer la plongée et la durée maximale de la plongée sans que le courant ne dépasse une valeur donnée. Pour des plongeurs débutants en mer à courant on évitera de plonger si le courant dépasse 0,4 à 0,5 nœuds et 0,8 nœuds pour des plongeurs expérimentés. Pour déterminer le moment de commencer la plongée : il faut relier les résultats obtenus lors des tracés de la « rose des courants » ou de la « méthode de la sinusoïde ».

³ Le tracé en exemple a été fait pour un site de plongée dans l'Oosterschelde (Pays-Bas, Zeeland). Le port de référence principal est Vlissingen et le port secondaire Wemeldinge. La plupart des annuaires de marées distribués ont comme port de référence Wemeldinge.



La plongée en mer à courant

5.5.3.1. Courant giratoire.

L'intersection entre la rose des courants et le cercle qui définit le courant maximum que l'on admet pour la plongée, détermine la durée maximum de la plongée et le moment de la mise à l'eau.

Exemple : déterminer le moment et la durée de la plongée pour le site de plongée dont la rose des courants est donnée à la figure 25 et l'annuaire des marées du port de référence donne la pleine mer à 14h15

Sur la figure 25, la zone plongeable a été grisée, on constate que :

- Le meilleur moment pour débiter la plongée débute 2h15 après le « moment zéro » qui est généralement la marée haute du port de référence.
- La plongée doit être terminée 3h45 après le « moment zéro ».
- La durée maximum de la plongée est donc de 90 minutes pour avoir la garantie que le courant ne dépasse pas 0,5 nœuds.

Il faut donc se mettre à l'eau à 16h30 et avoir terminé la plongée au plus tard à 18h00

5.5.3.2. Courant ayant deux sens alternés

Les intersections entre la sinusoïde et les droites qui définissent le courant maximum que l'on admet pour la plongée, déterminent la durée maximum de la plongée et le moment de la mise à l'eau. Il y a deux droites qui définissent le courant maximum admissibles :

- Le courant maximum rentrant qui positif (+) par convention.
- Le courant maximum sortant qui est négatif (-) par convention.

Exemple : déterminer les moments et les durées de la plongée pour le site de plongée dont la Sinusoïde des courants est donnée à la figure 26. A l'aide de l'annuaire des marées de Wemeldinge donne la pleine mer à 15h30 et la basse mer à 21h15

Sur la figure 26 les lignes du courant maximum admissible sont en rouge et les zones plongeables sont bleutées. On constate :

- Qu'il y a deux zones plongeables qui correspondent à la marée base et la marée haute. Dans l'exemple Vlissingen est le port principal et notre annuaire est de Wemeldinge. Il faut indiquer sur le dessin les moments des marées hautes (HW Wemeldinge) et basses (LW Wemeldinge) pour effectuer les mesures. Les facteurs de correction sont donnés dans l'annuaire des marées.
- La plongée à marée base :
 - Débute 5h30 avant la marée haute de Vlissingen (HW Vlissingen) soit 40 minutes avant la marée basse de Wemeldinge (LW Wemeldinge)
 - La durée maximum de la plongée est de 90 minutes pour avoir la garantie que le courant ne dépasse pas 0,5 nœuds.
- La plongée à marée haute :
 - Débute 1h00 après la marée haute de Vlissingen (HW Vlissingen) soit 35 minutes avant la marée haute de Wemeldinge (HW Wemeldinge)
 - La durée maximum de la plongée est de 55 minutes pour avoir la garantie que le courant ne dépasse pas 0,5 nœuds.

Il faut se mettre à l'eau : à la marée haute à 14h55 et à la marée base à 20h35



6.5.4. Pondération du calcul théorique.

Certaines directions du courant peuvent s'avérer nettement plus dangereuses que d'autres. Il convient de pondérer le calcul théorique du moment de mise à l'eau en fonction de la présence de ce type de courant.

- Eviter les courants qui risquent de vous mener dans des nasses, filets ou autres engins de pêche.
- Eviter les courants qui risquent de vous mener à proximité immédiate des zones portuaires ou autres zones interdites.
- Eviter les courants qui risquent de vous mener dans des zones particulièrement dangereuses comme les barrages anti-tempêtes, chenaux de navigation...

Non libre de droit



7. EQUIPEMENT SPECIFIQUE

La plongée dans des mers à courant ne nécessite que peu de matériel spécifique.

7.1. Equipement collectif

7.1.1. Bout de courant.

Le bout de courant, comme son nom l'indique est un bout qu'on laisse « trainer dans le courant ». Il s'agit d'une corde d'une dizaine de mètres, munie à son extrémité d'une bouée palangrier, qu'on attache à l'arrière de l'embarcation. A la mise à l'eau : elle permet aux plongeurs de se regrouper avant d'entamer la descente. Le diamètre de la corde doit être de minimum une dizaine de millimètre. Pour éviter que le milieu de la corde s'enfonce dans l'eau, il est conseillé de la munir de quelques flotteurs régulièrement répartis sur toute la longueur.

7.2. L'équipement individuel

Les risques spécifiques les plus importants sont : de se faire emporter par le courant ; de s'accrocher à un obstacle ou un filet ; de ne pas pouvoir regagner le point d'immersion et de se perdre en mer. Les équipements individuels ainsi leurs agencements, seront étudiés pour limiter ces risques et leurs conséquences.

7.2.1 Signalisation de surface.

Le risque d'être perdu en mer est muettement plus important que pour les autres formes de plongée. Pour localiser le plongeur perdu plus facilement on peut utiliser des moyens techniques tel que :

- Parachute de palier anti-déflation avec un dévidoir
- Kit de survie comprenant : miroir, cyalumes, lampe à éclats, fusées de détresse,
- Sifflet et Fumigène.
- Le parachute ayant tendance à se coucher par grand vent, on peut utiliser un drapeau jaune (détresse) sur un mat pliable et munir le drapeau d'une lampe à éclats.

Source : www.seamarshall-us.com/

- Des systèmes de détection pour les secours aériens du type EPIRBS (Electronic Position Indicating Radio Beacon)., le plus connu étant le « Sea Marshall ». Ce sont des émetteurs radios qui une fois activé émettent sur les fréquences aériennes de 121,5 et 243 MHz (Catégorie1). Les plus sophistiqués peuvent aussi émettre sur la fréquence 406,025 MHz (Catégorie 2), mais nécessite un enregistrement légal. Un hélicoptère qui vole à 1500m d'altitude détecte le signal dans un rayon de 50 Km ! Ce système rentre dans la catégorie des PLB (Personal Location Beacon) qui sont des balises de localisation personnelle. Elles sont à usage personnel et destinées à désigner une personne en détresse éloigné des services d'urgence.





La plongée en mer à courant

7.2.2. Outils tranchants.

Il est préférable d'avoir plusieurs outils tranchants. Les couteaux de plongée en acier inoxydable ont la particularité de très mal couper ! Pour trancher lignes de pêche ou filets, les cisailles ou coupe-fils sont largement plus efficaces.

7.2.3 Outil de stabilisation - Reef hook

Le « Reef hook » est un crochet muni d'une dragonne et d'un mousqueton. Ce système permet de se stabiliser dans le courant en n'occasionnant que des dégradations tout à fait négligeable sur l'environnement, tout en évitant des blessures aux mains !

Le courant maximum où il est encore possible de se tenir à une corde est de l'ordre de 2,5m/s soit 5 nœuds !



Source : www.amscud.com/

7.2.4. La Dragonne (Jon Line)

En cas de dissociation de la palanquée, il est difficile de retrouver son compagnon de plongée dans une mer à courant, étant donné que le courant varie verticalement. Si la visibilité devient trop faible, il peut être judicieux de relier les plongeurs deux par deux avec une dragonne. La dragonne est une corde de +/- 2,5m munie d'une bouche à chaque extrémité. Elle doit avoir une résistance à la rupture de minimum 150 daN et un diamètre minimum de 5mm. Pour éviter l'accrochage, il est préférable que la dragonne soit munie d'un flotteur en son milieu.



Quelques règles de bon usage sont à respecter :

- Ne jamais fixer une dragonne à l'équipement : risque d'arrachage
- La dragonne se fixe au poignet avec une bouche NON-serrante. Pour éviter de détacher accidentellement la dragonne, on la maintenir coincée entre le pouce et l'index.
- La plongée ne peut se faire qu'en binôme, jamais en trinôme.



Fig. 27

Les signes de plongée avec la dragonne

Question	Action	Réponse
Es-tu OK ?	1 coup sec	1 coup sec OK
Interrogation, tu vas trop vite, petit problème ...	2 coups secs	1 coup sec pour dire OK, arrêt, résolution du problème
Je suis sur « réserve » 50 bar	4 coups secs	1 coup sec pour dire OK
Gros problème, détresse	Coups saccadés	Accrocher l'équipier et mettre fin à la plongée,



8. CONFIGURATION DE L'ÉQUIPEMENT.

La configuration de l'équipement, dépend du style de plongée que l'on désire faire, mais certains principes sont immuables tel que :

- Laissez trainer les détendeurs, le manomètre, la combo..., c'est la meilleure manière de rester accroché. Tout ce matériel doit être accroché près du corps ;
- Fixer un couteau à la cheville est non seulement un piège à fil de pêche mais il est aussi difficile sortir de sa gaine... A proscrire absolument ;
- Pouvoir retrouver seul et se servir des pièces de son équipement dans le noir total ;
- S'assurer que la source d'air de secours soit parfaitement identifiable ;
- S'assurer que les pièces d'équipement se trouvent dans un triangle dont les sommets sont la bouche et les hanches ;
- S'assurer qu'on puisse manipuler seul, la vanne de manifold ;
- S'assurer que les outils sont atteignables de la main droite ET de la main gauche.

Fig. 28



- A: Détendeur principal
B: Détendeur de secours
C: Inflateur
D: Manomètre
E: Lampe de secours, cisaille, parachute...

9. LES TECHNIQUES

9.1. Préparation de la plongée

La plongée dans une mer à courant demande une planification et une préparation, plus « pointue et rigoureuse » qu'une plongée « normale ». Elle permet moins la distraction. Il est difficile de retourner sur le bateau ou, si on plonge du bord, de retourner sur le parking chercher une pièce d'équipement oubliée. L'heure de la marée risque d'être passée ! En plus de la planification classique, valable pour toutes les plongées, plusieurs points particuliers sont à examiner :

- Quelles sont les conditions de surface ?
- Le courant est-il giratoire ou va-t-il dans des sens alterné ?
- Quelle est la force et la direction du courant ?
- Si vous plongez du bord le courant peut-il vous ramenez vers votre point de départ ou pas ? Faut-il prévoir un point de sortie alternatif ?
- Quelle est la visibilité en immersion ?
- Quels est le nombre de participants ?
- Quels sont les niveaux d'expériences ?

Si le nombre de participants est important. La visibilité en immersion va déterminer le nombre de plongeurs par palanquée et donc le nombre de palanquées en fonction du nombre de participants. Si la visibilité ne dépasse pas 5m, il est préférable de limité la palanquée à deux plongeurs, éventuellement relié par une dragonne. Si l'expérience des plongeurs est assez limitée : il faut établir un plan de plongée simple et être très sécuritaire en termes des paramètres de profondeur et de temps.



9.2. La plongée

9.2.1. Préparation de la mise à l'eau.

Le point le plus important est que tous les plongeurs soient équipés et prêts à plonger en même temps : la marée n'attend pas ! Ce qui implique que le staff du bateau donne les consignes pour s'équiper suffisamment longtemps à l'avance. Que l'on plonge du bord ou à partir d'une embarcation, la vérification de pré-plongée doit être faite avec le plus grand soin afin de s'assurer que rien n'a été oublié. Par la suite les différentes palanquées se présentent en ordre à la mise à l'eau, masque et détendeur en place ainsi que le gilet légèrement gonflé pour une mise à l'eau en flottabilité positive.

9.2.2. La mise à l'eau.

Que l'on plonge du bord ou à partir d'une embarcation, la mise à l'eau ne doit pas être anarchique, tout en étant la plus rapide possible. Il ne faut jamais perdre de vue que la marée ne vous attend pas ! En partant du bord, il faut éviter que les palanquées se gênent entre-elles.

9.2.2.1. Mise à l'eau à partir d'une embarcation.

NE JAMAIS SE METTRE À L'EAU AVANT LE SIGNAL DU CAPITAINE DU BATEAU. De cette manière les moteurs ne sont débrayés qu'un minimum de temps.

La procédure est la suivante :

1. Arrivée sur le site et débrayage des moteurs.
2. Mise à l'eau du bout de courant.
3. Au signal du capitaine, les palanquées se mettent à l'eau en ordre. C'est-à-dire palanquée après palanquée
4. Puis, le plus rapidement possible, la palanquée se regroupe à l'extrémité du bout de courant.

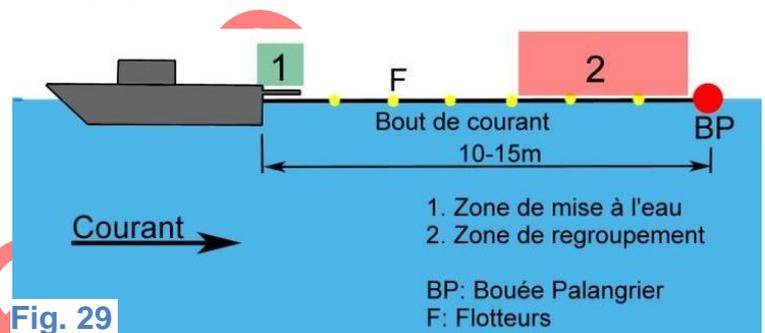


Fig. 29

9.2.2.1.1. Mise à l'eau en flottabilité négative.

Une autre possibilité de mise à l'eau, sans bout de courant, est la mise à l'eau avec le gilet dégonflé, c'est-à-dire en flottabilité négative. Le risque de dispersion des membres de la palanquée est largement plus important qu'avec le système utilisant le bout de courant. Cette méthode est généralement utilisée lorsque le site de plongée est assez petit et le nombre de palanquées réduits. Elle implique que tous les plongeurs se mettent à l'eau strictement au même moment, puis se laissent couler le plus rapidement possible à la profondeur d'évolution. Cette procédure ne peut être réalisée que sous les conditions suivantes :

- Plongeurs expérimentés et familiarisés avec les plongées dans le courant.
- Plongeurs ayant statistiquement peu de problèmes d'oreilles. Nombre de plongeurs par palanquée peu important.
- Nombre de palanquées peu important.
- Bonne visibilité.



9.2.3. La descente

Dès que les plongeurs se sont regroupés à l'extrémité du bout de courant et qu'ils se sentent prêt, le « chef de palanquée » donne le signe de la descente. Les autres membres de la palanquée, descendent au même rythme que celui-ci, jusqu'à la profondeur d'évolution. Si une bouée de repérage est utilisée :

- C'est le chef de palanqué qui déroule le bout de la bouée de marquage.
- C'est le chef de palanquée qui tire la bouée de marquage.
- Le bout sert uniquement de ligne de référence visuelle. En principe : on ne s'y accroche pas et on ne se tracte pas dessus ! Eventuellement on peut le tenir légèrement entre deux doigts.
- En cas de problème d'équilibrage, assurez-vous de ne pas perdre le bout de vue.
- Avant d'entamer la progression le chef de palanquée doit impérativement s'assurer que tous les plongeurs sont descendus.

9.2.4. L'évolution

Arrivé sur le fond ou à la profondeur d'évolution, le « chef de palanquée » vérifie si tous les plongeurs sont présents et qu'il n'y a pas de problème. Par la suite, il évalue la force et la direction du courant et indique aux plongeurs la direction à suivre. Trois cas peuvent se présenter :

1. Les courants sont giratoires : On plonge à contre-courant. En fin de plongée le courant va vous ramener plus ou moins en direction de votre point de départ.
2. Les courants sont alternés avec deux sens bien distincts et on plonge HORS de la période de renverse⁴ : On plonge à contre-courant. En fin de plongée le courant va vous ramener en direction de votre point de départ.
3. Les courants sont alternés avec deux sens bien distincts et on plonge A CHEVAL sur le moment de la renverse : On plonge dans le sens du courant. En fin de plongée le courant va s'inverser et vous ramener en direction de votre point de départ.

Pour se stabiliser près du fond, il est possible d'utiliser un « crochet à courant » (Reef hook).

9.2.5. La remontée

Toute la palanquée remonte au même moment. Pour une remontée groupée, les procédures sont les suivantes :

9.2.5.1. Plongée au départ d'une embarcation.

1. Le « chef de palanquée » indique au groupe la fin de plongée.
2. Les plongeurs se regroupent autour du chef de palanquée ».
3. Au signal, tous entament la remontée au même rythme que le « chef de palanquée ». Soit à la chaine de l'ancre, soit en utilisant le parachute. Il est préférable que chaque plongeur soit en possession d'un parachute.
4. Après les paliers, tous font surface et restent soit :
 - Près de leur parachute en attendant le bateau.
 - Près de la bouée du bout de courant.

Lors de la remontée, le bout ne sert que de référence visuelle : les plongeurs de doivent pas s'y accrocher et encore moins se halier sur le bout ! Tout au plus, ils peuvent le tenir légèrement.

⁴ -Improprement nommée « étale ».



La plongée en mer à courant

9.2.5.1. Plongée au départ d'un bord.

Dans la mesure du possible, il faut éviter de remonter en pleine eau. Les paliers se feront de préférence à proximité du fond ou du tombant. Il faut donc se rapprocher du bord en fin de plongée. Une direction de palanquée réussie, implique que la remontée se fasse à proximité immédiate du point de sortie

9.2.6. La sortie de l'eau.

Pour des raisons de sécurité, la remontée à bord du bateau ne peut se faire que lorsque les hélices sont débrayées et sur ordre du capitaine. Le plus facile, surtout lorsque les plongeurs sont nombreux, c'est de remettre à l'eau le bout de courant. Les plongeurs se regroupent à l'extrémité du bout et rejoignent chacun à son tour l'échelle. Il est de bon ton de laisser passer en premier les plongeurs les moins expérimentés, et/ou ceux qui donnent des signes de refroidissement. Le « chef de palanquée » remonte le dernier. La sortie de l'eau doit se faire en bon ordre, ne rester JAMAIS sous l'échelle lorsqu'un plongeur remonte ! Lorsque la plongée se fait du bord, les moins expérimentés sortent les premiers et le « chef de palanquée » en dernier.

Non libre de droit



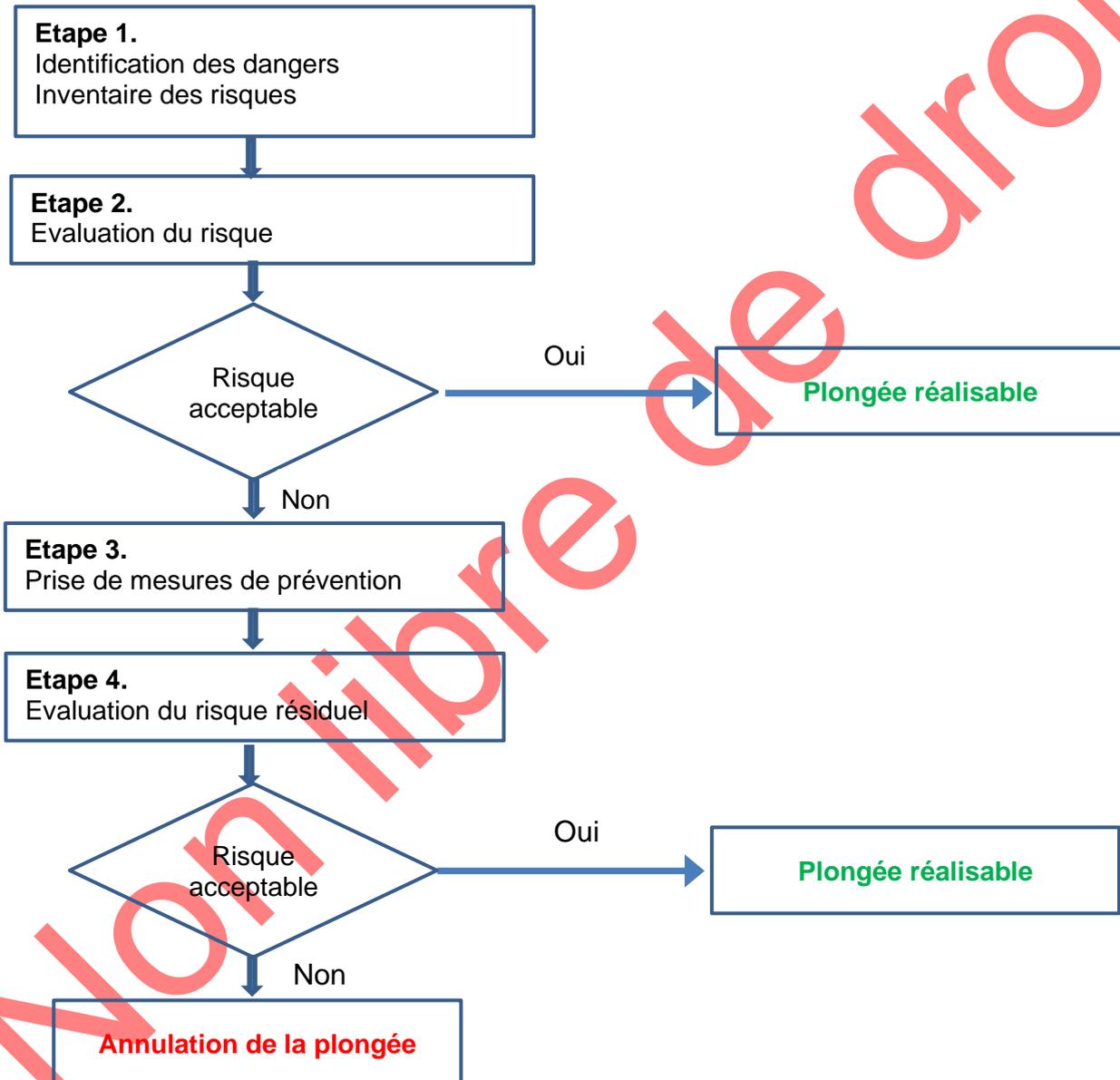
10. NOTIONS D'ANALYSE DES RISQUES.

10.1. Généralités

L'analyse des risques est une science complexe. Les résultats dépendent grandement de l'objectivité de la personne en charge de cette analyse. Certains facteurs pouvant être très subjectifs. Il existe diverses méthodes, celle que nous développons dans cet ouvrage est la méthode Kinney.

10.2. Etapes de l'analyse des risques

Une bonne analyse des risques doit être structurée et passer dans l'ordre par toutes les étapes illustrées dans graphique ci-dessous.





10.3. Définitions

- **Danger** : Tout élément qui peut mettre en péril l'intégrité physique et la sécurité du plongeur.
- **Exposition** : durée d'exposition au danger.
- **Domage** : Atteinte à l'intégrité physique ou psychologique du plongeur.
- **Risque** : Probabilité pour qu'un « Domage » se produise.
- **Risque résiduel** : Risque qui subsiste lorsque les mesures de prévention ont été prises.
- **Facteur de risque** : Elément ou évènement qui peut engendrer un « Domage ».
- **Prévention** : Toutes mesures pour limiter le « Risque », éviter les « Dommages » ou les atténuer.
- **Probabilité** : Paramètre variable en fonction de la nature du « Risque ».

10.4 Méthode Kinney

La Méthode Kinney est une méthode de hiérarchisation des risques et pas une méthode de dépistage des risques. Elle présente l'avantage d'être facile, rapide et de quantifier le risque. Le postulat de départ indique que le Risque (R_k) est proportionnel à la probabilité (P), à l'exposition (E) et la gravité des conséquences possibles (G). Ce qui conduit à écrire la formule suivante :

$$R_k = G \times E \times P$$

Cette formulation ne tient pas compte de la formation et de l'expérience. Malchaire J. & Koob J-P⁵ proposent d'en tenir compte en affectant la formule précédente d'un facteur (F), sans toutefois donner un tableau de valeur. La relation devient donc :

$$R_k = G \times E \times P \times F$$

Avec :

- R_k : Risque estimé suivant la méthode Kinney.
- G : Gravité des conséquences possibles (Domage).
- E : Durée d'exposition au facteur de risque.
- P : Probabilité d'émergence du dommage pendant la durée d'exposition.
- F : Facteur qui tient compte de la formation et de l'expérience.

Des tableaux donnent pour ces trois facteurs des valeurs numériques⁶. L'estimation du « score » du risque est le produit de ces facteurs. Le score ainsi obtenu pourrait être nuancé en fonction de la formation, l'expérience et la pratique régulière ou non du plongeur. Ce score permet à tout un chacun d'estimer si le risque est acceptable ou non.

La première difficulté consiste à faire l'inventaire des facteurs de risque. Il n'est pas facile de ne rien oublier ! La seconde difficulté, qui est de loin la plus gênante consiste à calculer le « score ». Celui-ci peut fortement varier en fonction de l'observateur, de son expérience, de sa sensibilité, de sa formation, de son niveau d'études, de son expérience de terrain... D'après l'étude de Malchaire J. & Koob J-P, le « score » peut varier en fonction de l'observateur dans une fourchette de 1 à 15.

⁵ Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques - Malchaire J. & Koob J-P – Université catholique de Louvain

⁶ Les tableaux originaux donnaient une échelle de coût. Dans le cadre de la plongée loisir, je n'ai pas trouvé utile de les reprendre. D'autant plus que les originaux datent de 30 ans, sans mise à jour des valeurs !



10.4.1. Tableaux des facteurs G, E et P

10.4.1.1. « Gravité » (G)

Gravité	Conséquences	Valeur
Catastrophique	Nombreux morts	100
Désastre	Quelques morts	40
Très grave	Un mort	15
Sérieux, grave	Blessure sérieuse, invalidité permanente	7
Important	Blessure incapacitante	3
Incident	Petite blessure non incapacitante	1

10.4.1.2. « Exposition » (E)

Exposition	Valeur
En continu	10
Régulièrement, de l'ordre d'une fois par jour	6
De temps à autre, de l'ordre d'une fois par semaine	3
Parfois, de l'ordre d'une fois par mois	2
Quelques fois par an	1
Maximum une fois par an	0,2

10.4.1.3. « Probabilité » (P)

Probabilité	Valeur
Probable	10
Possible	6
Inhabituel mais possible	3
Petite possibilité dans des cas limites	1
Concevable mais peu probable	0,5
Pratiquement impossible	0,2
A peine concevable	0,1

10.4.2. Tableaux de l'évaluation du « Risque » (R_k)

En fonction du « score » ce tableau indique le degré d'acceptabilité du risque.

Valeur	Evaluation	Action
$R_k > 400$	Risque très élevé	Risque tout à fait inacceptable
$200 < R_k \leq 400$	Risque élevé	Mesures de correction impératives
$70 < R_k \leq 200$	Risque important	Adopter des mesures de correction
$20 < R_k \leq 70$	Risque moyen	Attention particulière requise
$R_k < 20$	Risque faible	Acceptable



10.4.3. Analyse de risque

Le tableau ci-dessous représente une analyse de risque, non exhaustive, pour la recherche et la récupération d'objets. Le tableau ne reprend pas les risques généraux liée à la plongée (panne d'air...)

Risque	Conditions	Facteurs / score				Prévention	Risque résiduel			
		G	E	P	R _k		G	E	P	R _k
Perte en mer	Courant faible	7	3	1	21	Parachute avec réel, marquage de surface, équipe de surveillance	7	3	0,1	2,1
	Courant moyen	7	3	3	63	Parachute avec réel, marquage de surface, équipe de surveillance, miroir, sifflet	7	3	0,2	4,2
	Courant fort	15	2	6	180	Parachute avec réel, marquage de surface, équipe de surveillance, miroir, sifflet, crochet, balise de détresse (Sea Marshall)	15	2	0,5	15
Perte du buddy		1	6	6	36	Dragonne	1	6	0,2	1,2

Note : le tableau est basé sur l'expérience de l'auteur est n'est donné qu'à titre didactique. La probabilité (P) a été estimée avec le plus de rigueur possible. Néanmoins, comme expliqué au chapitre précédent, celle-ci dépend grandement du ressenti. De ce fait il y a toujours une part de subjectivité. L'exposition (E) a été estimée en fonction d'un plongeur régulier qui plonge au minimum 5 fois par mois. Chacun devra adapter les facteurs en fonction de son style de plongée et des circonstances locales. Le partage du matériel avec le compagnon de plongée n'est pas considéré comme une option valable.

La liste n'est pas exhaustive

Non libre



11. BIBLIOGRAPHIE

- Les marées tome 1 (1979), DARS M., BESSERO G., GUEVEL D. ; ed : Ecole nationale supérieure de techniques avancées. ISBN 2-7225-0452-9
- Les marées tome 2(1979), DARS M., BESSERO G. ;ed : Ecole nationale supérieure de techniques avancées. ISBN 2-7225-0463-4
- Les Guides du SHOM - La Marée (1997), co-édition ; ed : SHOM ISBN 2-11-088188-7
- La marée océanique côtière (2007),SIMON Bernard ; ed :institut océanographique ISBN 978-2903581329
- Stoomatlas HP33 (2013) ed ; Dienst der Hydrografie v.d. Koninklijke Marine ISBN 8-717073-14886

Non libre de droit