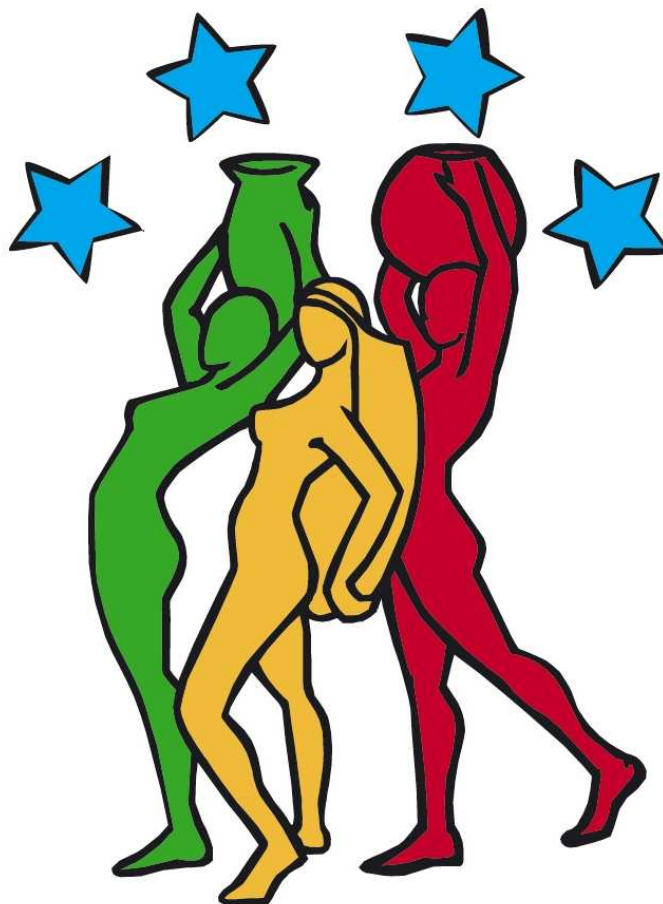




dans le cadre du programme BEACHMED-E
ATLAS HYDRODYNAMIQUE DU
LANGUEDOC-ROUSSILLON

Version française

Outils numériques utilisés



23 novembre 2009

Présentation des outils numériques utilisés

Dans ce chapitre, on présente les modèles utilisés pour produire l'Atlas Hydrodynamique. Les modélisations réalisées à l'échelle du plateau interne permettent de forcer les modélisations réalisées à l'échelle littorale. On rappelle que l'échelle du plateau interne (ou échelle pré-littorale) correspond à des domaines de quelques dizaines de kilomètre de long, entre les bathymétries 60m et la côte, en excluant la zone de déferlement. La seconde échelle est une échelle littorale au sens strict, c'est à dire concernant un linéaire de plage de l'ordre de quelques kilomètres au maximum, de la profondeur de fermeture de la houle au large à la plage.

Les caractéristiques des modèles utilisés doivent répondre aux contraintes suivantes :

- à l'échelle du plateau interne, les courants de circulation générés par les vents et les gradients de salinité/température sont en compétition avec les courants de houle. Une approche permettant de tenir compte des effets couplés de ces deux familles de courants est donc nécessaire, en tenant également compte des transformations importantes de la houle (réfraction, diffraction, atténuation,...) lors de sa propagation sur le domaine du plateau interne.
- à l'échelle littorale, le déferlement de la houle à une grande influence sur les courants générés, ainsi que sur la surcôte. Les effets de réfraction sont importants, et la diffraction peut l'être encore plus en présence de variations topobathymétriques importantes ou en présence d'ouvrages de protection, généralement émergés.

Dans ce contexte, nous avons opté pour l'utilisation du modèle de circulation SYMPHONIE, écrit par le LA Toulouse, et d'autre part, le codes REFDIF (Kirby et Dalrymple, 1995). Le couplage entre le code SYMPHONIE et REFDIF a été réalisé dans le cadre de la thèse de Cléa Denamiel (2006). On parlera de SYMPHONIE-S pour désigner le modèle couplé. Le code couplé dispose de toutes les caractéristiques de ses codes parents : gestion des forçages grande-échelle, forçage par le vent et les gradients de salinité-température, forçage aux exutoires des fleuves, prise en compte de la réfraction et diffraction, prise en compte de l'effet de la houle sur la circulation 3D. Dans ce document, il est également question d'ALADIN. Il s'agit d'un modèle de circulation atmosphérique à "relativement" haute résolution ($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) développé à Météo-France, utilisé dans des projets d'océanographie opérationnelle comme MFSTEP pour forcer les modèles de circulation océanique. Nous utilisons les forçages ALADIN pour les modélisations à l'échelle de plateau interne (et plus large).

Rédigé par: **Cléa Denamiel (sur la base de sa thèse); Frédéric Bouchette (compléments)**

1 Le modèle de propagation de la houle REFDIF

1.1 REFDIF : Aspects théoriques et numériques

Le modèle en résolution de phase REF/DIF est développé par le Center of Applied Coastal Research (CACR), Delaware, USA (Kirby et Dalrymple, 1983 ; Kirby, 1995). Ce modèle est particulièrement adapté à la modélisation de la réfraction, la diffraction, l'atténuation et le shoaling de la houle.

En effet, le modèle REF/DIF est tel que pour chaque domaine, l'axe Ox de vecteur directeur unitaire \vec{i} est orienté du large vers la côte et l'axe Oy suit la frontière ouverte sur le large. L'angle de la houle θ que forme la houle est tel que : $\theta = \left(\vec{i}, \vec{k} \right)$. On distingue quatre cas différents, côte à l'Est, côte à l'Ouest, côte au Nord ou côte au Sud (figure 4.1).

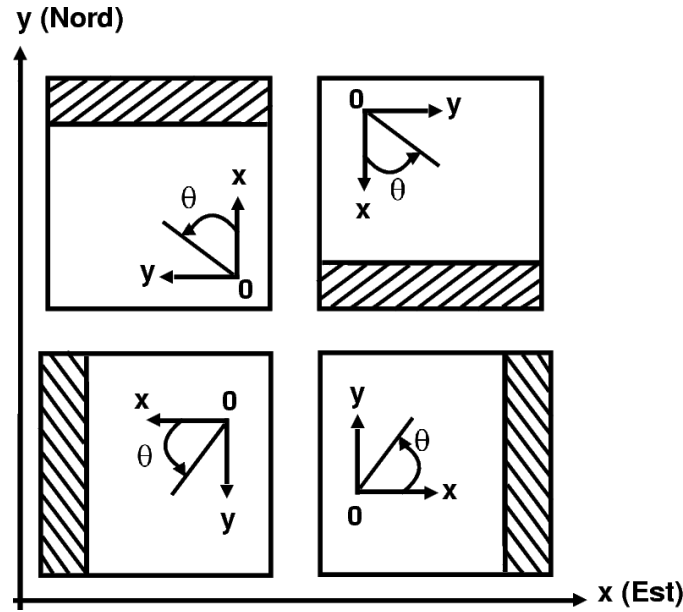


FIG. 1 – Définition des axes et de l'angle de propagation de la houle utilisés par le modèle REF/DIF.

En ce qui concerne la modélisation de la houle, le modèle REF/DIF prend en compte les effets non linéaires limités au troisième ordre puisqu'il génère des houles de Stokes du troisième ordre en profondeur finie. La forme de la houle (forme de la surface libre complexe) modélisée est donc donnée par :

$$\eta(x, y, t) = A e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma' t)} + \alpha_2 A^2 e^{2i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma' t)} + \alpha_3 A^3 e^{3i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma' t)} \quad (4.1)$$

Avec :

- α_2, α_3 les coefficients des ordres supérieurs ;
- $A = A(x, y)$ l'amplitude complexe de la houle

En ce qui concerne la modélisation de la propagation de la houle, l'équation de Berkhoff (mild-slope equation) linéaire (Berkhoff, 1972) sous sa forme parabolique (Radder, 1979), la relation de dispersion et l'équation de diffraction sous sa forme parabolique (Mei et Tuck, 1980) sont à la base du modèle REF/DIF qui utilise une discrétisation spatiale en différences finies (mailles rectangulaires de taille constantes).

Cependant ces trois équations ont été modifiées afin d'introduire d'une part les effets non linéaires de la houle de Stokes de troisième ordre (Kirby et Dalrymple, 1984) et d'autre part les effets des courants de circulations 2D (Booij, 1981 ; Kirby et Dalrymple, 1984). Les équations régissant le modèle sont donc :

1 - Couplage entre l'équation de Berkhoff et l'équation de diffraction modifiées

$$\begin{aligned} & (C_g + U_{Doppler}) \frac{\partial A}{\partial x} + V_{Doppler} \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k) A \\ & + \frac{\sigma'}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g + U_{Doppler}}{\sigma'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V_{Doppler}}{\sigma'} \right) \right\} A \\ & - \frac{i}{2\sigma'} \frac{\partial}{\partial y} \left((CC_g - V_{Doppler}^2) \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma' \frac{k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{\varpi}{2} = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Avec :

- \bar{k} la moyenne suivant y du nombre d'onde
- $D = \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2\tanh^2(kh)}{8\sinh^4(kh)}$ l'apport du terme non linéaire (houle du troisième ordre)

- $\overrightarrow{U_{Doppler}} = (U_{Doppler}, V_{Doppler})$ les courants Doppler (voir chapitres 2 et 3)

- ϖ le facteur de dissipation

2 - Relation de dispersion (Hedge, 1976)

$$\sigma'^2 = gk \cdot \tanh \left(kh \left(1 + \frac{|A|}{h} \right) \right) \quad (4.3)$$

Cette équation de dispersion, différente de celle présentée au chapitre 1, permet de rendre compte des non linéarités de la houle.

D'autre part une des originalités de REF/DIF est de proposer différents types de dissipation pour modéliser le facteur de dissipation ϖ :

- dissipation par frottements visqueux :

A l'interface air/eau d'une part et à l'interface eau/sédiments, en considérant que la couche superficielle des sédiments peut être modélisée par une couche visqueuse à caractère dissipatif, la différence de viscosité entre les deux milieux engendre une couche limite qui dissipe la houle. Le facteur de dissipation suit alors les lois de Phillips (1966) :

$$\begin{cases} \varpi_{surf\ visqueux} = \frac{\sigma' k \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma}} (1-i)}{\tanh(kh)} \\ \varpi_{fond\ visqueux} = \frac{2\sigma' k \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma}} (1-i)}{\sinh(2kh)} \end{cases} \quad (4.4)$$

Avec ν la viscosité cinématique de l'eau.

- dissipation par porosité des sédiments :

Les fonds marins étant majoritairement constitués de matériaux granulaires poreux qui ont la capacité de dissiper la houle, le facteur de dissipation par porosité est donné par (Kirby et Dalrymple, 1992) :

$$\varpi_{poreux} = \frac{gkC_p(1-i)}{\cosh^2(kh)}$$

avec C_p le coefficient de perméabilité (en m^2), $C_p = 4.5 \cdot 10^{-11} m^2$.

- dissipation par turbulence :

Le facteur qui tient compte de la turbulence dans la couche limite à l'interface eau/sédiment est donné par (Dean et Dalrymple, 1984 ; Kirby et Dalrymple, 1992) :

$$\varpi_{turbulent} = \frac{2\sigma' k f |A| (1-i)}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)} \quad (4.6)$$

avec f le facteur de friction de Darcy-Weisbach, $f = 0.01$.

- dissipation par déferlement :

Lorsque la houle déferle le facteur de dissipation est modifié et se modélise par (Dally *et al.*, 1985 ; Kirby et Dalrymple, 1986) :

$$\varpi_{deferlement} = \frac{KC_g \left(1 - \left(\frac{\gamma h}{2|A|} \right)^2 \right)}{h}$$

avec : $\gamma = 0.4$ et $K = 0.017$ des constantes empiriques (Dally *et al.*, 1985)

Cette dissipation n'a lieu que lorsque le critère de déferlement est atteint. Celui utilisé par le modèle REF/DIF est donné par (Fredsoe et Deigaard, 1992) : $2|A| \geq 0.78h$

La dissipation globale de la houle peut alors s'exprimer par la somme de toutes ou partie des lois de dissipation qui viennent d'être présentées.

La dissipation liée au déferlement est toujours prise en compte alors que le choix entre les autres formes de dissipation est géré par l'utilisateur dans le modèle REF/DIF.

En ce qui concerne le choix parmi les lois de dissipation et la sensibilité du modèle à ces dernières, une étude complète a été réalisée par Bouchette (2001).

Il apparaît dans cette étude que si tous les facteurs de dissipation sont pris en compte alors le point de déferlement des vagues est retardé au maximum. C'est le cas de figure qui sera toujours envisagé dans notre étude.

1.2 REFDIF : limitations du modèle

Au niveau des limitations liées aux processus physiques, le modèle REF/DIF ne modélise pas :

- la réflexion de la houle sur les obstacles qu'ils soient émergés ou immergés ;
- les caractéristiques de la houle lors du déferlement (par contre en dehors de la zone de déferlement, les caractéristiques de houle modélisées par REF/DIF sont valables sur la zone de surf et de swash). En effet lorsque le critère de déferlement donné par $2|A| \geq 0.78h$ (Fredsoe et Deigaard, 1992) est atteint alors le modèle REF/DIF arrête la propagation de la houle définie au large et repropage jusqu'à la côte une onde monochromatique dont les caractéristiques sont celles calculées par un algo simple de déferlement (Kirby & Dalrymple, 1995) ;
- l'effet du vent local sur la houle.

Au niveau des limitations d'ordre numérique, le modèle REF/DIF :

- impose que la taille des mailles de la grille soit assez fine pour permettre d'avoir 5 points de calcul par longueur d'onde de houle ;
- génère de nombreux artefacts numériques sur les bords du domaine lorsque la houle est introduite avec un angle. La conséquence de cette deuxième limitation est que l'introduction d'une houle inclinée réduit la zone dans laquelle le modèle donne des résultats valides.

Afin de montrer ces artefacts, des simulations ont été réalisées avec le modèle REF/DIF pour des houles de 2 m d'amplitude et de 10 s de période au large se propageant avec un angle d'incidence de : 0° , 20° et 40° .

Lorsque la houle se propage avec un angle d'incidence nul au large alors le calcul des paramètres de houle par REF/DIF est valable sur l'ensemble du domaine. Par contre lorsque la houle se propage avec un angle d'incidence non nul (20° et 40° sur l'exemple) alors REF/DIF génère une zone de réflexion (à gauche du domaine) et une zone d'ombre (à droite du domaine) où le calcul de la houle n'est pas valable. Plus l'angle d'incidence de la houle est grand et plus les zones où le calcul de la houle n'est pas valable sont grandes.

Cette mauvaise modélisation des paramètres de la houle, pour les angles d'incidence non nuls, est caractéristique des modèles utilisant la forme parabolisée de l'équation de Berkhoff.

Les seules manières de s'en affranchir sont soit d'agrandir le domaine de modélisation afin que la zone que l'on souhaite étudier reste comprise dans la zone de validité du modèle REF/DIF même pour des angles importants (autorisé jusqu'à 60° au plus dans REF/DIF) soit de tourner le domaine de telle sorte qu'il soit incliné dans le sens de propagation de la houle. Dans le cadre de l'Atlas Hydrodynamique, nous utilisons une combinaison de ces deux méthodes en fonction du rendu souhaité. Le problème est donc traité au cas par cas.

2 Le modèle de circulation océanique côtière SYMPHONIE

2.1 SYMPHONIE : cadre théorique et aspects numériques

Les modèles tridimensionnels de courantologie côtière reposent sur les équations primitives tridimensionnelles (par exemple Johns *et al.*, 1991).

Notre choix s'est porté sur le modèle SYMPHONIE, développé par le Pôle d'Océanographie Côtière (POC), Toulouse, France (Estournel *et al.*, 1997 ; Marsaleix *et al.*, 1998). En effet, d'une part il est particulièrement adapté à la modélisation côtière dans le Golfe du Lion où il a été validé à de nombreuses reprises et d'autre part il avait déjà été utilisé sur des zones pré-littorales comme le golfe de Fos (Ulses *et al.*, 2005).

Modes barotrope / barocline Pour prendre en compte les ondes de gravité barotropes (2D) se propageant plus rapidement que les ondes de gravité baroclines (3D), le modèle SYMPHONIE distingue deux modes de calcul dont les pas de temps sont dissociés : le mode interne (mode barocline) et le mode externe (mode barotrope). La séparation des pas de temps entre ces deux modes est réalisée suivant la technique de Blumberg et Mellor (1987) et permet de rendre compte d'une part des courants moyennés sur la verticale réactualisés avec une résolution temporelle assez fine et d'autre part des courants tridimensionnels réactualisés avec un pas de temps moins fin.

Discrétisation spatiale des équations Le modèle SYMPHONIE utilise une discrétisation en différences finies (mailles rectangulaires de taille constante) de type Arakawa C (Arakawa et Suarez, 1983).

La discrétisation verticale est donnée en coordonnées sigma généralisées telles que : $\sigma = \frac{h+z}{D}$.

Les coordonnées sigma sont particulièrement adaptées lorsque l'on souhaite rendre compte des effets de la bathymétrie sur l'hydrodynamique cependant leur utilisation n'est pas recommandée lorsque l'on travaille avec des dénivellations bathymétriques importantes (Ulses, 2005). Récemment le modèle SYMPHONIE a été amélioré afin d'utiliser des coordonnées hybrides sigma-z qui permettent d'avoir une résolution adaptée aussi bien à la zone littorale que hauturière. Les cartes réalisées dans le cadre de l'Atlas à partir de la version 0.99 sont faites avec ce système de coordonnées.

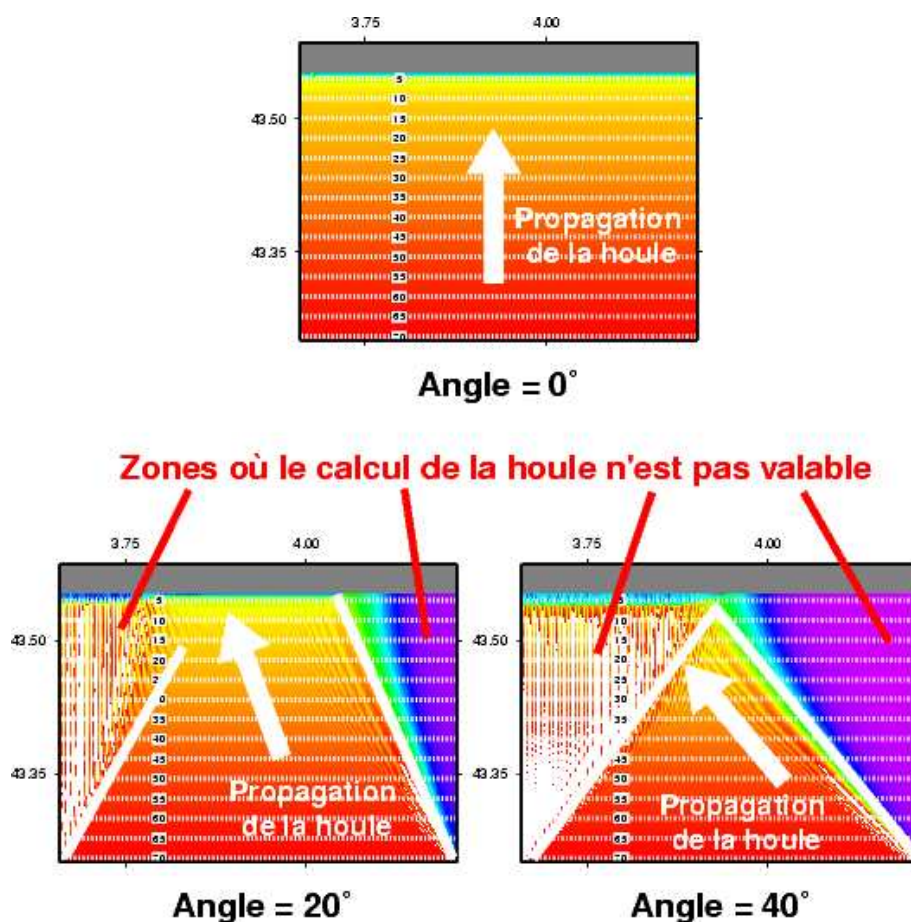


FIG. 2 – Mise en évidence des zones où la houle n'est pas modélisée correctement pas REF/DIF lorsqu'elle se propage avec un angle d'incidence non nul.

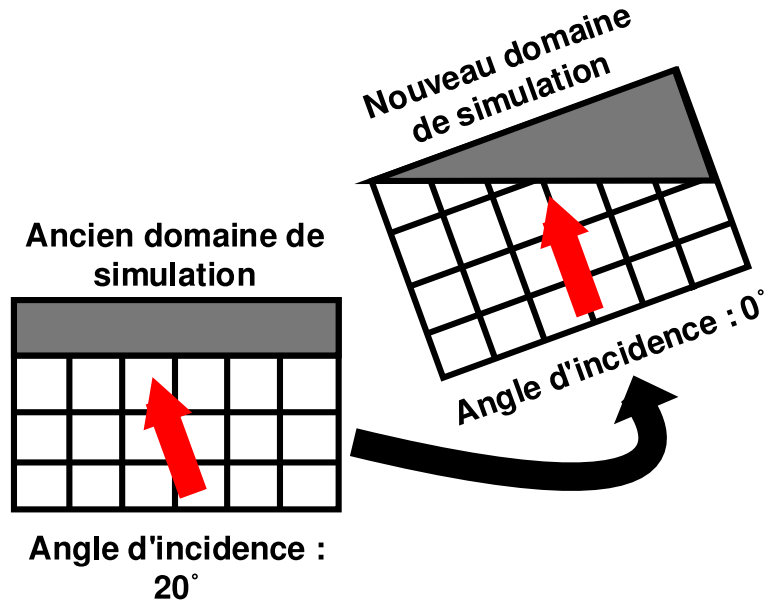


FIG. 3 – Inclinaison des grilles REF/DIF en fonction de l'angle d'incidence au large de la houle

Selon la date des études menées, nous utilisons par la suite soit les coordonnées sigma généralisées soit les coordonnées hybrides sigma-z.

Discretisation temporelle des équations Le modèle SYMPHONIE utilise une discrétisation temporelle explicite avec un schéma saute-moutons [leapfrog] tel que la valeur au temps $t + 1$ de la variable A soit donnée par :

$$A^{t+1} = A^{t-1} + 2\Delta t \cdot F(A^t)$$

Avec :

- Δt le pas de temps du modèle
- F la fonction permettant de calculer A^{t+1} à partir de A^t

Un lissage temporel permettant d'éviter la divergence des solutions en agissant comme une force de rappel est donné par le schéma associé au filtre d'Asselin (1972) :

$$A_{Asselin}^t = A^t + \frac{\alpha_{Asselin}}{2} (A^{t+1} - 2A^t + A^{t-1})$$

Avec $\alpha_{Asselin} = 0.3$ le coefficient du filtre d'Asselin.

Equations du modèle Les équations régissant le mode externe ont été décrites permettent d'obtenir les courants moyennés sur la verticale du mode externe : $\vec{u}_E = (u_E, v_E)$ tels que :

$$\vec{u}_E = \frac{\vec{Q}_c}{D} \quad (4.10)$$

Les équations régissant le mode interne et permettant d'obtenir les courants tridimensionnels $\vec{u}_I = (u_I, v_I)$ sont données en coordonnées sigma par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D\bar{u}_I}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}_I \bar{u}_I}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}_I \bar{u}_I}{\partial y} + \frac{\partial \Omega \bar{u}_I}{\partial \sigma} - f D\bar{v}_I + \frac{\partial D P_c}{\partial x} = \\ \quad \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} P_c \right) - g D \frac{\partial \zeta_c}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial D\bar{v}_I}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}_I \bar{v}_I}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}_I \bar{v}_I}{\partial y} + \frac{\partial \Omega \bar{v}_I}{\partial \sigma} + f D\bar{u}_I + \frac{\partial D P_c}{\partial y} = \\ \quad \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} P_c \right) - g D \frac{\partial \zeta_c}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial P_c}{\partial \sigma} = -Dg \frac{\rho_c}{\rho_0} \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Le couplage entre le mode interne et externe permet alors de calculer les courants de circulation :

$$\vec{u}_c = \vec{u}_I - \frac{1}{D} \int_{-h}^{\zeta_c} \vec{u}_I dz + \frac{1}{N} \sum_N \vec{u}_E \quad (4.12)$$

Avec N tel que le pas de temps du mode externe soit N fois plus petit que celui du mode interne.

Enfin, ces courants permettent de résoudre les équations de transport de salinité et de température et l'équation de fermeture de la turbulence.

2.2 SYMPHONIE : Conditions d'utilisation du modèle

Pour utiliser le modèle SYMPHONIE en conditions réalistes il est nécessaire d'utiliser deux types de forçages :

- des forçages grande échelle,
- des forçages atmosphériques.

2.2.1 Forçages grande échelle

Une utilisation pratique du modèle SYMPHONIE en zone de plateau interne à littorale impose d'avoir recours à une imbrication de grilles. Par exemple si l'on souhaite réaliser une simulation à l'échelle du plateau interne avec une résolution horizontale de 500 m par 500 m, on utilisera une première grille dont la résolution est de 1.5 km par 1.5 km qui permet de générer la circulation océanique à l'échelle régionale (par exemple : à l'échelle du Nord de la Méditerranée) puis une deuxième grille de résolution de 1 km par 1 km (jusqu'à 500 m par 500 m) qui rend compte de la circulation à l'échelle côtière et enfin une dernière grille de résolution 500 m par 500 m (jusqu'à 100 m par 100 m) qui couvre la zone de plateau interne étudiée. Si l'on souhaite encore zoomer sur la zone littorale (plateau de Frontignan par exemple) on peut réaliser une dernière imbrication avec une grille de 20 m par 20 m de résolution horizontale. Cette procédure permet d'une part d'initialiser la circulation générale et d'autre part de générer les conditions limites de la grille couvrant la zone de plateau interne.

Initialisation de la circulation générale Les deux procédés utilisés pour initialiser la circulation, à l'échelle régionale, sur la première grille sont l'aboutissement des études menées au POC sur l'initialisation des modèles à surface libre (Auclair *et al.*, 2001 ; Estournel *et al.*, 2003).

Il s'agit d'une part du procédé nommé Modified Potential Vorticity (MPV) qui repose sur la résolution des équations régissant la fonction de courant Ψ définie par :

$$\begin{cases} Q_{cx} = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ Q_{cy} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad (4.13)$$

Il est utilisé lorsque l'on ne connaît pas la circulation grande échelle pour générer les fichiers des transports de la circulation générale ainsi que de l'élévation de la surface libre qui permettront d'initialiser et de forcer les conditions limites de la deuxième grille. Une description plus complète du modèle est donnée par Estournel *et al.* (2003) et Auclair *et al.* (2003).

D'autre part, lorsque l'on a accès à des résultats générés par des modèles de grande échelle (OGCM), tels que OPA (Madec, G., M. Chartier, P. Delecluse, and M. Crépon, 1991 : A three-dimensional numerical study of deep water formation in the Northwestern Mediterranean Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1349-1371), il est alors possible de les utiliser pour initialiser le modèle Symphonie et le forcer à ses frontières ouvertes en utilisant une méthode d'initialisation variationnelle tridimensionnelle, méthode VIFOP (Auclair *et al.*, 2001). Les conditions de forçage aux frontières latérales ouvertes sont alors données par (Oey et Chen, 1992) :

$$\begin{cases} \vec{U} = U_0 \pm \sqrt{gH} (\eta - \eta_0) \\ \nabla_h \varphi = \nabla_h \varphi_0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Avec φ la composante tangentielle du transport et des vitesses baroclines et U_0 , η_0 et φ_0 les forçages grande échelle issus de OPA.

Génération des conditions limites pour le plateau interne La deuxième grille permet d'une part de générer la circulation 3D sur une zone englobant la zone pré-littorale mais aussi de générer les fichiers grande échelle des courants de circulation, des transports, de la surface libre, de la salinité et de la température. Ces fichiers permettent d'une part d'initialiser l'hydrodynamique de la troisième grille mais aussi de forcer les conditions limites de la zone de plateau interne tous les X pas de temps (par exemple toutes les 3 heures).

2.2.2 Forçages atmosphériques

Les forçages atmosphériques sont :

- les flux radiatifs : flux solaire et flux Infra Rouge ;
- les flux de chaleur : flux de chaleur latente et flux de chaleur sensible calculés à partir de l'humidité, de la pression atmosphérique, de la pression de la mer et des précipitations ;
- les tensions de cisaillement dues au vent.

Les flux de chaleur et les tensions de cisaillement dues au vent sont calculés, dans le modèle SYMPHONIE, à partir des formules bulk (Geernaert, 1990) et des sorties du modèle haute résolution de MétéoFrance : ALADIN. Dans certains cas, en zone de plateau interne, le vent peut être issu des mesures de stations météorologiques terrestres.

3 Le modèle couplé houle/courant tri-dimensionnel : SYMPHONIE-S

Le modèle SYMPHONIE-S est constitué de quatre modules, un module de courant, un module de houle, un module de transfert du module de courant vers le module de houle et un module de transfert du module de houle vers le module de courant.

3.1 Module de houle du modèle SYMPHONIE-S

Le module de houle du modèle SYMPHONIE-S est constitué du modèle REF/DIF auquel plusieurs améliorations ont été apportées :

- création d'une interface permettant d'une part de travailler dans le repère géographique décrit au chapitre 1 et d'autre part de ne modifier qu'un seul fichier d'entrée dans lequel tous les paramètres de la simulation seront inscrits. Pour réaliser cette interface nous sommes largement inspiré de la procédure utilisée dans le modèle SYMPHONIE.
- création d'un sous-module, dans le code du modèle REF/DIF, qui permet de calculer les vitesses Doppler (2D) à partir des courants 3D modélisés par le modèle SYMPHONIE suivant la procédure de Kirby et Chen (1989).

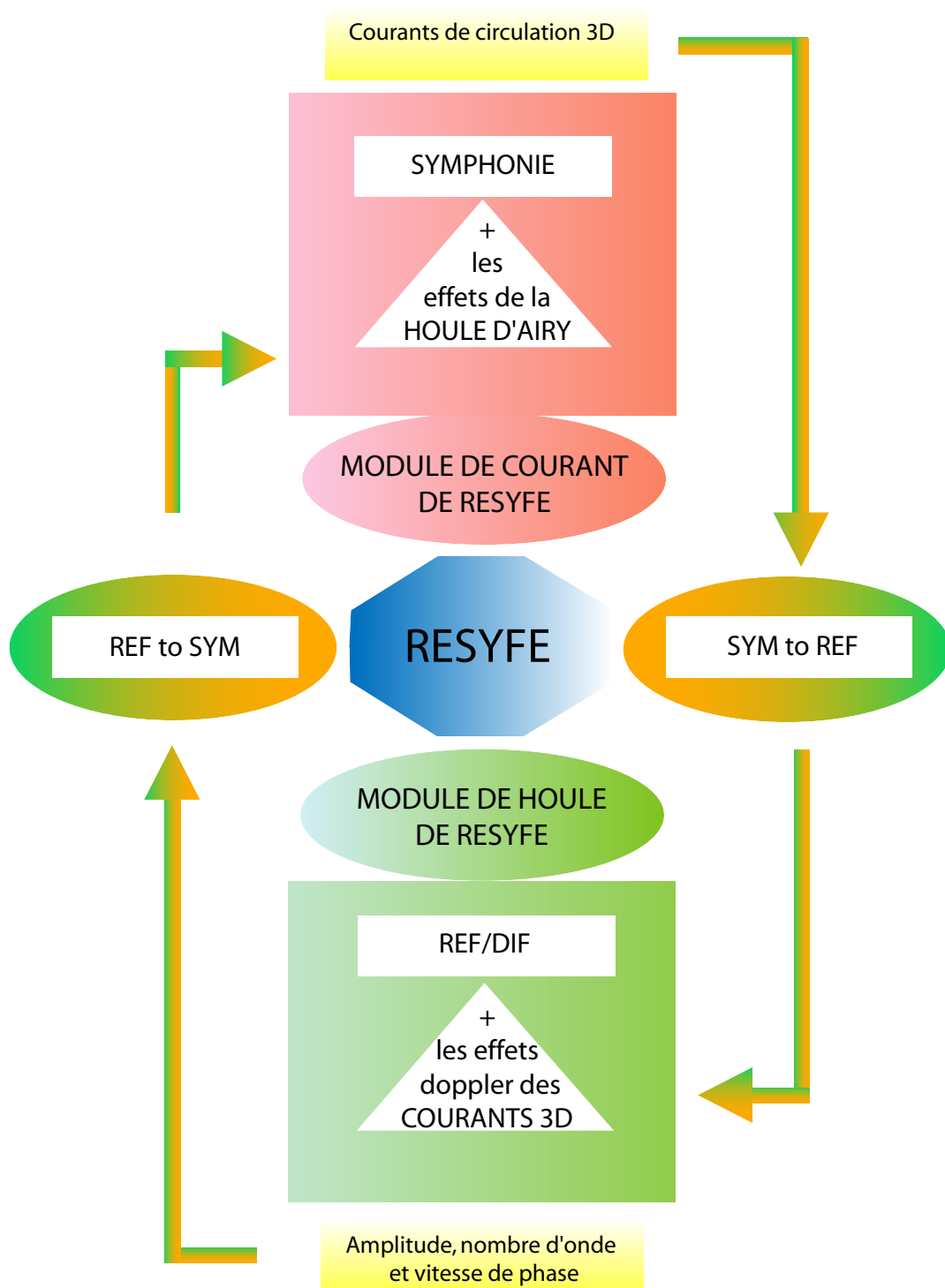


FIG. 4 – Modules constituant le modèle SYMPHONIE-S

Les sorties du modèle REF/DIF qui nous intéressent sont les sorties d'amplitude, de nombre d'onde projeté sur les axes horizontaux et la vitesse de phase.

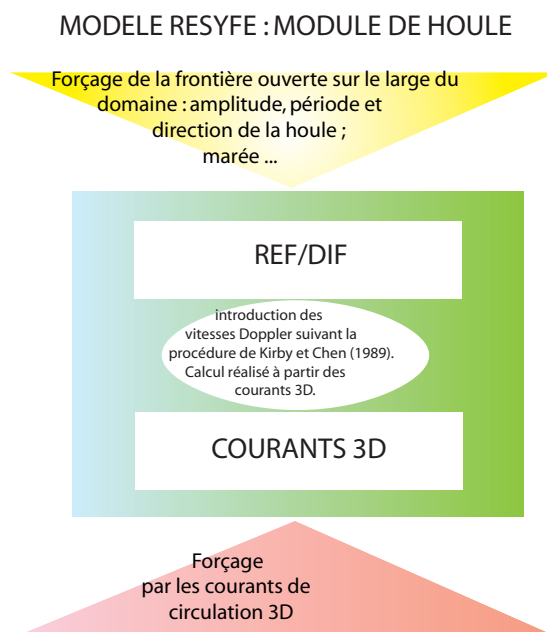


FIG. 5 – Module de houle du modèle SYMPHONIE-S : forçages et modifications apportées au modèle REF/DIF

3.2 Module de courant du modèle SYMPHONIE-S

Le module de courant de SYMPHONIE-S est constitué du modèle SYMPHONIE auquel deux modifications majeures ont été apportées :

- création d'un fichier de paramètres qui permet de définir si l'on souhaite modéliser les interaction Houle/Courants de circulation et le cas échéant où trouver les fichiers de houle correspondants à la simulation.
- création d'une routine spécifique de calcul des effets de la houle qui permet de modifier :
 - les conditions initiales et aux limites ouvertes du domaine ;
 - les tensions de cisaillement de surface et de fond ;
 - les flux de chaleur latente et sensible ;
 - l'énergie cinétique de la turbulence ;
 - les équations primitives : introduction des tensions de radiation, des termes de surpression et éventuellement des termes correctifs proposés par Arduin (2006).

ATTENTION : La modification de l'énergie cinétique de la turbulence tout comme celle des flux de chaleur ne sont pas utilisées avant indication explicite dans ce document.

Aux forçages grande échelle et atmosphériques s'ajoutent les forçages de houle monochromatique qui sont constitués de quatre fichiers :

- amplitude ;
- nombre d'onde suivant x ;
- nombre d'onde suivant y ;
- vitesse de phase.

Ces fichiers permettent de réactualiser les conditions de houle tous les X pas de temps (par exemple toutes les 3 heures) et de calculer les forçages qui permettent de tenir compte de la houle (monochromatique) dans le calcul de la circulation.

Les sorties du modèle qui vont nous intéresser pour le couplage sont les courants de circulation 3D.

MODELE RESYFE : MODULE DE COURANT

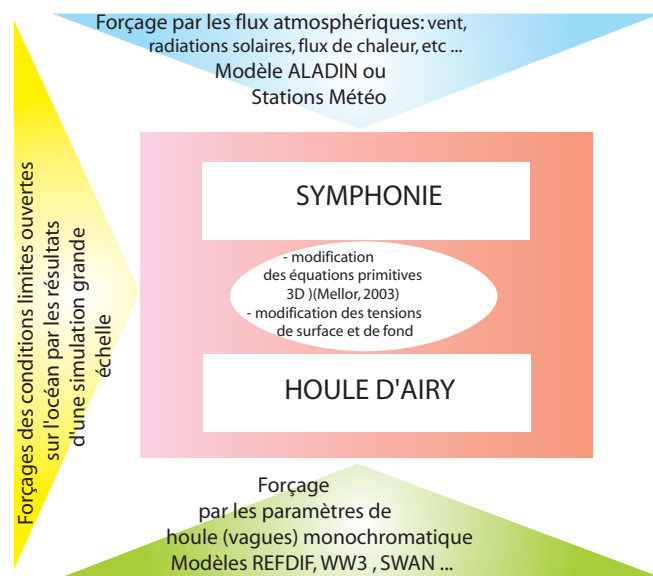


FIG. 6 – Module de courants du modèle SYMPHONIE-S : forçages et modifications apportées au modèle SYMPHONIE

3.3 Les modules de transfert : SYMtoREF et REFtoSYM

3.3.1 Les problèmes rencontrés

Le transfert des champs de courants du module de courant au module de houle du modèle SYMPHONIE-S et le transfert des caractéristiques de houle du module de houle vers le module de courant ont été l'une des principales difficultés rencontrées lors de la mise en place du modèle.

En effet, d'une part le modèle REF/DIF impose une résolution fine d'au plus 20 m par 20 m ainsi que des domaines tournés dans le sens de propagation de la houle (ou surdimensionnés) et d'autre part le modèle SYMPHONIE impose une résolution de l'ordre de la centaine de mètres pour la zone de plateau interne.

Ainsi pour forcer le modèle REF/DIF avec les courants 3D issus du modèle SYMPHONIE (ou du module de courant du modèle SYMPHONIE-S), il est nécessaire d'une part d'interpoler les données afin de passer d'une résolution de par exemple 500 m par 500 m à une résolution de par exemple 20 m par 20 m et d'autre part de définir un domaine orienté dans le sens de propagation de la houle et contenu dans le domaine défini pour le calcul des courants de circulation.

De même pour forcer le modèle SYMPHONIE avec une houle d'Airy issue du modèle REF/DIF (ou du module de houle du modèle SYMPHONIE-S), il est nécessaire d'une part d'effectuer une projection qui consiste à moyenner sur les X points de grille les plus proches puis à lisser les résultats obtenus afin de passer d'une résolution de 20 m par 20 m à une résolution de 500 m par 500 m.

En pratique cette procédure pose plusieurs problèmes :

- En ce qui concerne REF/DIF (ou le module de houle de SYMPHONIE-S) : le fait de devoir tourner les domaines dans le sens de propagation de la houle réduit la zone de calcul ; le surdimensionnement des domaines quant à lui impose de travailler avec des matrices énormes (de l'ordre de 3000 par 3000) qui ralentissent le calcul. De plus le passage d'une résolution de 500 m à une résolution de 20 m peut générer des discontinuités si l'on n'utilise pas une interpolation adaptée.
- En ce qui concerne SYMPHONIE (ou le module de courant de SYMPHONIE-S) : le fait de moyenner et lisser la donnée de houle, entraîne forcément une perte d'information sur la forme de la houle.

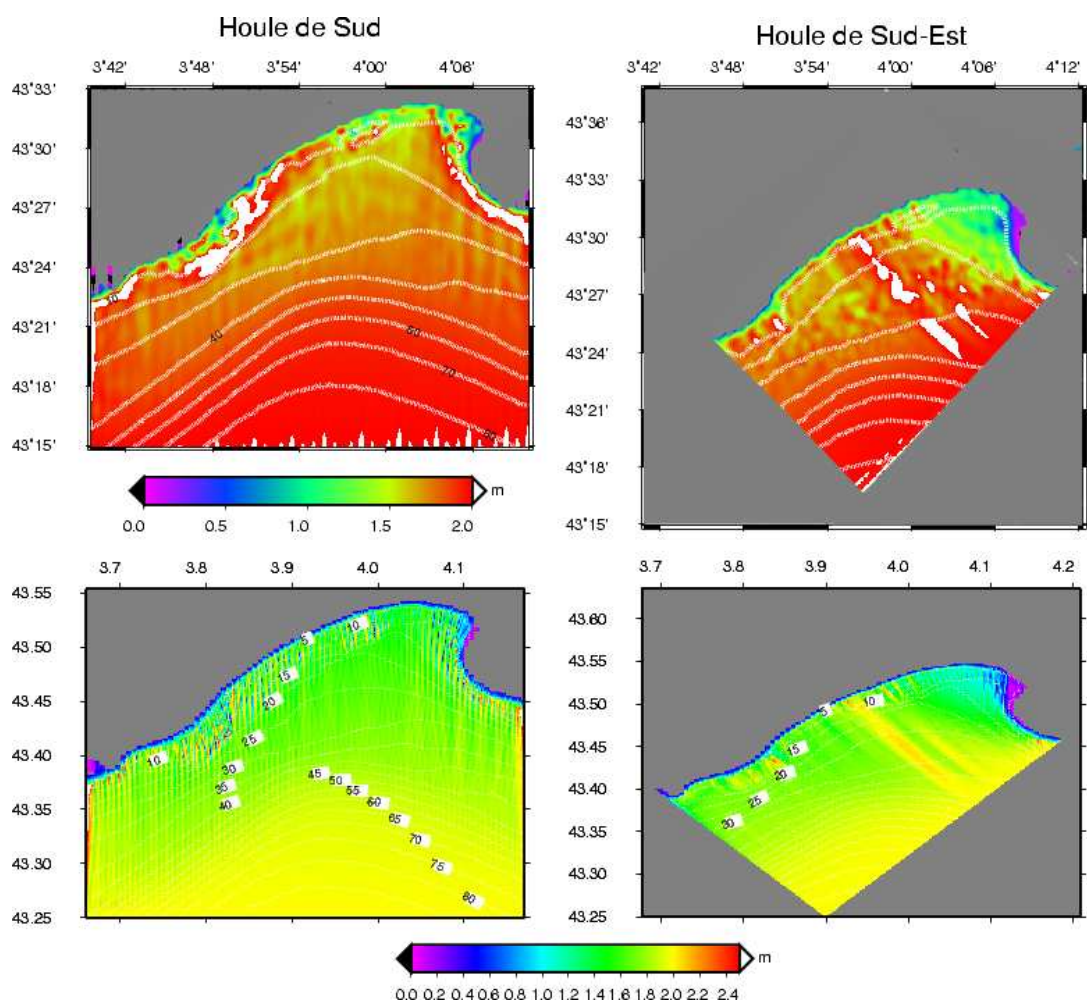


FIG. 7 – Mise en évidence de la perte d'information générée par la projection des données de houle sur la grille de calcul du module de courant du modèle SYMPHONIE-S : lissage des bandes de réfraction et d'une partie des effets de la diffraction.

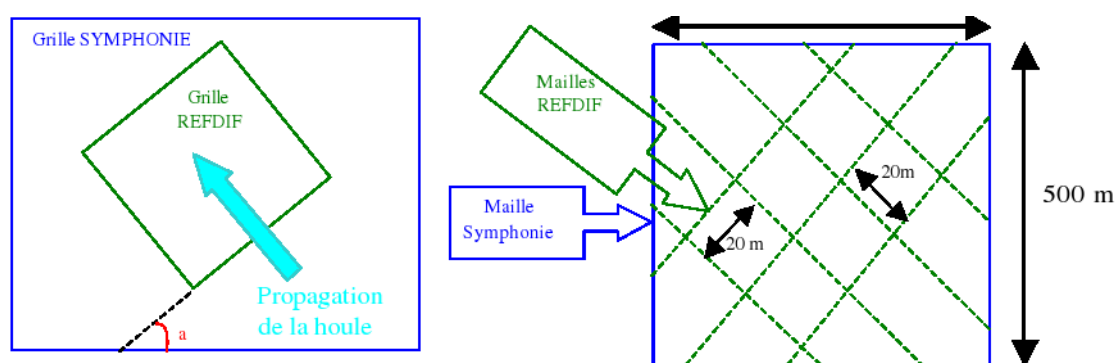


FIG. 8 – Passage d'une grille Symphonie (ou module de courant du modèle SYMPHONIE-S) à une grille REF/DIF.

De plus, lorsque nous avons commencé à utiliser le module de houle du modèle SYMPHONIE-S en introduisant les courants de circulation, nous nous sommes aperçu que, pour générer correctement la réfraction de la houle sur de forts courants, le modèle REF/DIF devait être utilisé avec un domaine de très faible résolution (maille de l'ordre de 5 m). Or les zones pré-littorale de plateau interne couvrent en général des domaines de l'ordre de 90 km² ce qui imposerait de travailler avec des matrices de dimensions 6000 par 6000. Au vu des moyens de calcul dont nous disposons, il n'est pas possible de travailler avec de telles matrices. Le forçage par les courants de circulation du module de houle, n'est donc, pour le moment, opérationnel que pour de petites zones littorales.

3.3.2 Utilisation pratique du modèle SYMPHONIE-S en zone pré-littorale de plateau interne

Etant donné les différents problèmes rencontrés pour le passage du module de houle au module de courant du modèle SYMPHONIE-S, nous avons décidé :

- de ne pas tenir compte des courants de circulation pour le calcul de la propagation de la houle ;
- de faire tourner le modèle REF/DIF sur un domaine très large englobant la zone pré-littorale étudiée incliné dans le sens de propagation de la houle dominante durant la période étudiée ;
- de faire tourner le module de courant de SYMPHONIE-S sur la zone pré-littorale étudiée.

Le module SYMtoREF Le passage du modèle SYMPHONIE (ou du module de courant de SYMPHONIE-S) au modèle REF/DIF consiste donc à interpoler la bathymétrie d'un grand domaine englobant la zone pré-littorale pour passer d'une maille de 500 m par 500 m à une maille de 20 m par 20 m. L'interpolation initialement utilisée était une interpolation barycentrique qui est peu coûteuse en temps de calcul mais elle engendrait de nombreuses discontinuités se traduisant par une interpolation en nid d'abeille. Afin de remédier à ce problème nous avons eu recours à une interpolation en splines bicubiques (Attéia et Gaches, 1999 ; McKinley et Levine, 2000) qui permet d'obtenir un lissage et une continuité des données interpolées ainsi que de leurs dérivées spatiales (premières et secondes). La théorie de cette interpolation a déjà été présentée dans un rapport de DEA (Denamiel, 2003).

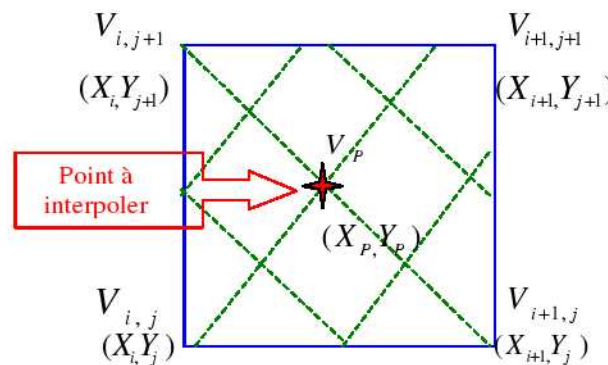


FIG. 9 – Interpolation bicubic spline pour trouver la valeur V_p du point (X_p, Y_p) : prise en compte des valeurs $(V_{i,j}, V_{i+1,j}, V_{i,j+1}, V_{i+1,j+1})$ aux quatre coins $((X_i, Y_j), (X_{i+1}, Y_j), (X_i, Y_{j+1}), (X_{i+1}, Y_{j+1}))$ de la maille du domaine Symphonie (ou module de courant du modèle SYMPHONIE-S) ainsi que de leurs dérivées première et seconde (Denamiel, 2003).

Le module REFtoSYM Le passage du modèle REF/DIF au module de courant du modèle SYMPHONIE-S consiste d'une part à redimensionner le domaine pour qu'il ne couvre que la zone pré-littorale étudiée et d'autre part à moyenner et lisser les données de houle (amplitude, nombre d'onde suivant x et y et vitesse de phase) sur le domaine ainsi défini.

Procédure d'utilisation du modèle SYMPHONIE-S Dans l'état actuel des développements, la procédure d'utilisation du modèle SYMPHONIE-S sur le golfe du Lion est la suivante :

- extraction d'une bathymétrie de résolution 200 m par 200 m sur un large domaine englobant la zone pré-littorale que l'on souhaite étudier ;
- interpolation, via le module SYMtoREF, de la bathymétrie afin d'obtenir une grille de calcul de résolution 20 m par 20 m ;
- calcul des paramètres de houle, via le module de houle de SYMPHONIE-S, sur toute la période de la simulation. Le modèle REF/DIF ne donnant qu'une vision instantanée de la propagation de la houle, il faut donc générer la forme de la houle à chaque fois que cette dernière est réactualisée dans le module de courant du modèle SYMPHONIE-S. Par exemple : si la simulation dure 12 h et que les conditions de houle sont réactualisées toutes les trois heures, il faudra faire tourner 4 fois le module de houle du modèle SYMPHONIE-S ;
- redécoupage, moyenne et lissage des données de houle, via le module REFtoSYM, afin de générer les fichiers de forçage de houle sur la grille de résolution 500 m par 500 m ne couvrant que la zone pré-littorale que l'on souhaite étudier ;
- calcul des courants de circulation 3D forcé par les résultats grande échelle, plus les conditions atmosphériques plus les conditions de houle, via le module de courant du modèle SYMPHONIE-S sur la zone pré-littorale étudiée.