

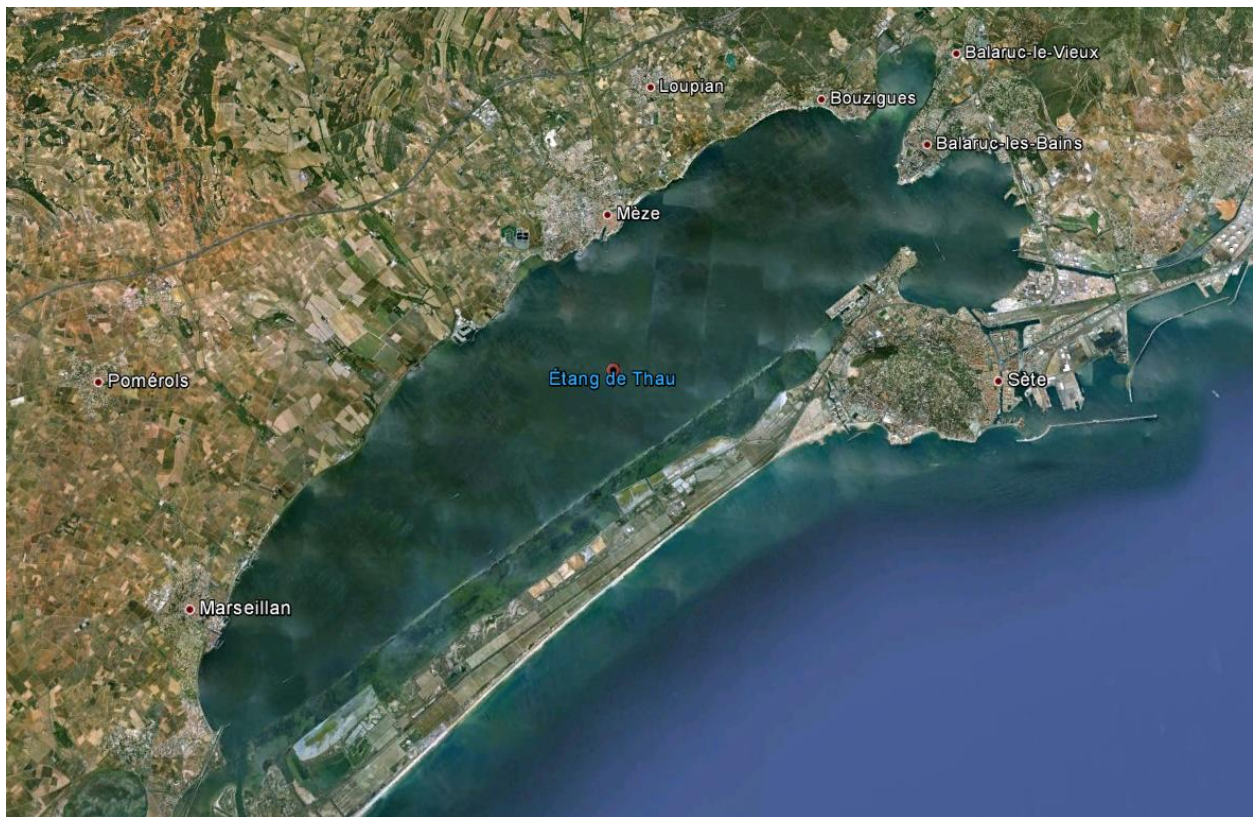
Aix-Marseille Université
Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO)
Master d'Océanographie 1er année

OCE 108 Projet Environnement
Responsable : Mr Millet

Modélisation des flux d'Azote dans le bassin de Thau et étude de la variabilité spatiale des apports anthropiques d'Azote.

Par Sébastien LE CLEC'H

<sebastien.le-clec-h@univmed.etumel.fr>



Résumé

Le modèle établi par Leendertse en 1971 et amélioré par Millet en 1989 permet d'obtenir des cartes de l'évolution d'une pollution dans l'étang de Thau en fonction de différents forçages plus ou moins importants qui mettent en place une courantologie typique de ce vent, ou qui permette la répartition plus ou moins grande des polluants. Ici il est considéré comme polluant de l'Azote en provenance de la Vène, une rivière où se trouvent en amont les rejets d'une station d'épuration d'une grande agglomération du Languedoc Roussillon (Sète). Lorsqu'on applique un vent de Nord - Ouest de 325 ° on obtient une carte courantologique caractéristique du bassin. En ajoutant un flux continu d'Azote (ou autre polluant) il est alors facilement possible de suivre l'évolution de cette pollution au cours du temps à travers l'étang en fonction des différents courants qui se mettent en place. Mais ceci ne reflète pas complètement la réalité. Pour correspondre au mieux à la réalité il faut tenir compte de l'activité biologique du bassin qui tend à faire diminuer les concentrations en Azote dans l'eau par le biais de la production de phytoplancton qui le consomme. On se rend alors compte que la concentration en Azote est proportionnelle à la concentration en phytoplancton. Cette augmentation en phytoplancton peut avoir des repercussions sur toutes l'activité économique autour du bassin. Principalement pour les conchyliculteurs qui voient leurs baignoires croître ou bien au contraire, disparaître lors de crise dystrophique.

Abstract

Le modèle établi par Leendertse en 1971 et amélioré par Millet en 1989 permet d'obtenir des cartes de l'évolution d'une pollution dans l'étang de Thau en fonction de différents forçages plus ou moins importants qui mettent en place une courantologie typique de ce vent, ou qui permette la répartition plus ou moins grande des polluants. Ici il est considéré comme polluant de l'Azote en provenance de la Vène, une rivière où se trouvent en amont les rejets d'une station d'épuration d'une grande agglomération du Languedoc Roussillon (Sète). Lorsqu'on applique un vent de Nord - Ouest de 325 ° on obtient une carte courantologique caractéristique du bassin. En ajoutant un flux continu d'Azote (ou autre polluant) il est alors facilement possible de suivre l'évolution de cette pollution au cours du temps à travers l'étang en fonction des différents courants qui se mettent en place. Mais ceci ne reflète pas complètement la réalité. Pour correspondre au mieux à la réalité il faut tenir compte de l'activité biologique du bassin qui tend à faire diminuer les concentrations en Azote dans l'eau par le biais de la production de phytoplancton qui le consomme. On se rend alors compte que la concentration en Azote est proportionnelle à la concentration en phytoplancton. Cette augmentation en phytoplancton peut avoir des repercussions sur toutes l'activité économique autour du bassin. Principalement pour les conchyliculteurs qui voient leurs baignoires croître ou bien au contraire, disparaître lors de crise dystrophique.

Kew Words : Azote, Phytoplancton, lumière, Etang de Thau, Lagune, Courant, Vent.

Sommaire

1	Introduction	3
2	Caractéristiques de l'étang de Thau.	4
2.1	Caractéristiques morphologiques et climatiques.	4
2.2	Caractéristiques atmosphériques.	5
2.3	Caractéristiques des différentes sources anthropiques.	5
2.4	Conséquences des apports de matière organique.	6
3	Matériels et méthodes.	6
3.1	Le modèle.	6
3.2	Activité physique et Biologique du modèle.	8
3.3	Déroulement de l'analyse.	9
4	Résultats.	9
4.1	Première étape.	9
4.1.1	Courantologie induite par le vent de Nord - Ouest : la Tramontane.	9
4.1.2	Conclusion	10
4.2	Deuxième étape.	10
4.2.1	Activation de la source de pollution station 1 et observation des déplacements.	10
4.2.2	conclusion	11
4.3	Troisième étape.	11
4.3.1	Activation de la biologie pour la station active et un vent de Tramontane (NE - 325 °)	11
4.3.2	conclusion	12
4.4	Quatrième étape.	12
4.4.1	Etude de sensibilité du modèle à la température	12
4.4.2	Etude de la sensibilité du modèle à l'insolation.	13
4.4.3	Etude de la sensibilité du modèle au stock de mollusque disponible.	13
4.4.4	Conclusion	13
5	Discussion	14
6	References	15
7	Annexes.	15

1 Introduction

Les lagunes sont un type de morphologie côtière qui représente 3% de la surface continentale mondiale. Il s'agit d'une zone où un banc de sable et de galets, apportés par les fleuves et les rivières se sont déposés parallèlement à la côte renfermant ainsi une masse d'eau marine, aussi appelé 'lido', 'cordon littoral' ou localement 'lagune'. Ces bassins représentent en Méditerranée 0.2% de la surface. C'est dans les régions Provence Alpes cote d'azur (PACA), Languedoc-Roussillon (LR) et corse que se répartissent les lagunes Méditerranéennes Françaises. Nous allons nous intéresser ici plus particulièrement à la région Languedoc-Roussillon où les lagunes représentent 3% de la surface pour une superficie totale de 60 000 Hectares. L'étang de Thau, est le plus grand étang de la région Languedoc-Roussillon. Situé à l'Ouest de la ville de Sète, il a une superficie de 7 500 ha, il est en communication avec la mer par les chenaux de Sète et plus modestement, par le grau de Pisse-Saumes. De nombreux cours d'eau s'y jettent (Vène, Soupié, Canal du Rhône, du Midi, etc.).

L'étang de Thau est aussi une zone économiquement riche, Environ 600 établissements conchylicoles y sont installés, produisant plus de 12 000 tonnes d'huîtres par an, et employant environ 2 000 personnes. L'ensemble de la zone conchylicole occupe sensiblement 1/5 de sa surface répartie en 3 zones, zone A (50% de la surface conchylicoles), zone B (25%) et zone C (25%) (Figure 2). Enfin d'importantes activités nautiques et touristiques ont lieu dans cette zone. Activité humaine importante et apports fluviaux, sont souvent considérés comme des sources de pollution. Les plus importantes sources sont naturellement constituées par les agglomérations : Marseillan, Mèze, Bouzigues, Balaruc et surtout Sète. Les effluents des agglomérations gagnent le plus souvent l'étang de Thau par les caniveaux des voies publiques et par les fossés lorsque la capacité de traitement des eaux usées est supérieure à la possibilité des différentes stations d'épurations mises en place par les municipalités. Ou bien lorsque celles-ci ne sont pas assez efficaces pour épurer les eaux usées de toute matière organique. Les eaux de ruissellement, l'impact de la viticulture et l'agriculture autour du bassin de Thau représentent la deuxième cause de pollution. Les industries proches ont aussi un impact, mais pas seulement sur les apports d'Azote, aussi sur des substances chimiques tel

que les hydrocarbures. Enfin une dernière source de contamination dont l'influence est d'ailleurs variable selon les saisons est constituée par le canal du Rhône, du Midi et dans certains cas seulement par le canal des Salins, qui sont souvent en période estivale emprunter par les touristes en bateaux qui y vident leur calle d'eau usée. Toutes ces pollutions se jettent dans l'étang et c'est pourquoi il souffre régulièrement d'une augmentation dramatique de la concentration en matière organique (Azote et Phosphore principalement) pouvant engendrer de nombreuses conséquences. Les premiers touchés par ces pollutions sont les exploitants conchylicoles, qui voient leurs naissains disparaître lors d'épisode d'eutrophisation, ou interdit à la vente lors de développement de microorganisme toxique. Mais l'activité touristique, elle même source de pollution se voit interdire toute activité sur la lagune en cas de pollution dépassant des concentrations réglementaires.

On peut alors se demandé, si l'emplacement des sources de pollutions (rivière, rejet des stations d'épurations) et l'hydrodynamisme du bassin de Thau peuvent être corrélé pour mieux voir les déplacements de ces polluant aux seins de l'étang afin d'y déterminer les zones les plus protégées pour les activités conchylicoles et de loisir dans l'objectif de réduire au maximum les impacts économiques.

Table 1: Bilan des apports en Azote et Phosphore du bassin versant vers la lagune de Thau en pourcentage.(sources Agence de l'eau, Cépralmar, Région LR, Département de l'Hérault, Département de Pyrénées Orientales, 2006)

	Origine des apports d'Azotes 2	Origine des apports de Phosphore
Station d'épuration	34%	46%
Ruissellement	13%	24%
Industries	1%	8%
Agriculture	34%	18%
Atmosphère	18%	3%
Total	100%	100%

2 Caractéristiques de l'étang de Thau.

2.1 Caractéristiques morphologiques et climatiques.

Comme toute lagune le bassin de Thau est caractérisé par une faible profondeur moyenne, de l'ordre de 4.5 m. Mais on trouve des fonds de 10 m et un tiers des fonds est à plus de 5,50 m. La profondeur maximum est de 30 m au lieu de la Bise. La longueur maximale de l'étang atteint plus de 19 km et la largeur minimale est de 1 300 m. On le sépare traditionnellement en deux zones, l'Etang des Eaux Blanches, près de SETE et BALARUC-LES-BAINS (600 hectares) au Sud-Est et le Grand Etang (partie centrale et occidentale, 6 900 hectares). On trouve aussi la crique de l'Angle dans la région Nord-Est. Le volume des eaux contenues dans l'étang peut être évalué à 340 000 000 m³. En fait, cette masse d'eau subit des apports et des pertes diverses : précipitations, eaux de ruissellement et communications avec la mer par l'intermédiaire des différents chenaux. La marée, quoique peu importante en Méditerranée, fait alternativement rentrer et sortir de l'eau de mer dans l'étang. Le changement de niveau d'eau engendré dans l'étang s'évalue entre 1 et 5cm. Les vents créés aussi une pente à la surface de l'eau et permette ainsi l'apport ou l'export d'eau. Enfin l'évaporation constitue le principal facteur responsable des pertes d'eau. Les températures annuelles très élevées alliées aux vents fréquents (qui augmentent l'évaporation) entraînent l'évaporation d'une colonne d'eau évaluée à 1 250 mn par an (Andouin 1962). D'une manière générale, et en raison des volumes d'eau concernés, les eaux de l'étang sont plus chaudes en été et plus froides en hiver que celles de la mer. Tout au long de l'année, la température de l'eau évolue entre + 7 °C et + 24 °C (extrêmes : + 4 °C et + 27 °C). La température moyenne annuelle est de l'ordre + 15 °C (Hamon 2002). En règle générale, la température de l'eau suit de près la température atmosphérique.

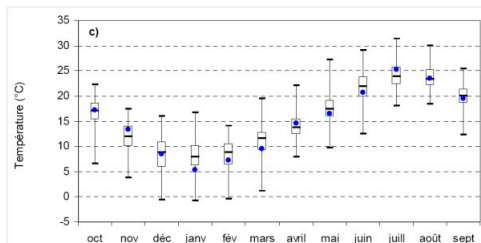


Figure 1: Variation de la température de l'étang de Thau au cours d'une année. (Réseau suivi lagunaire Languedoc-Roussillon)

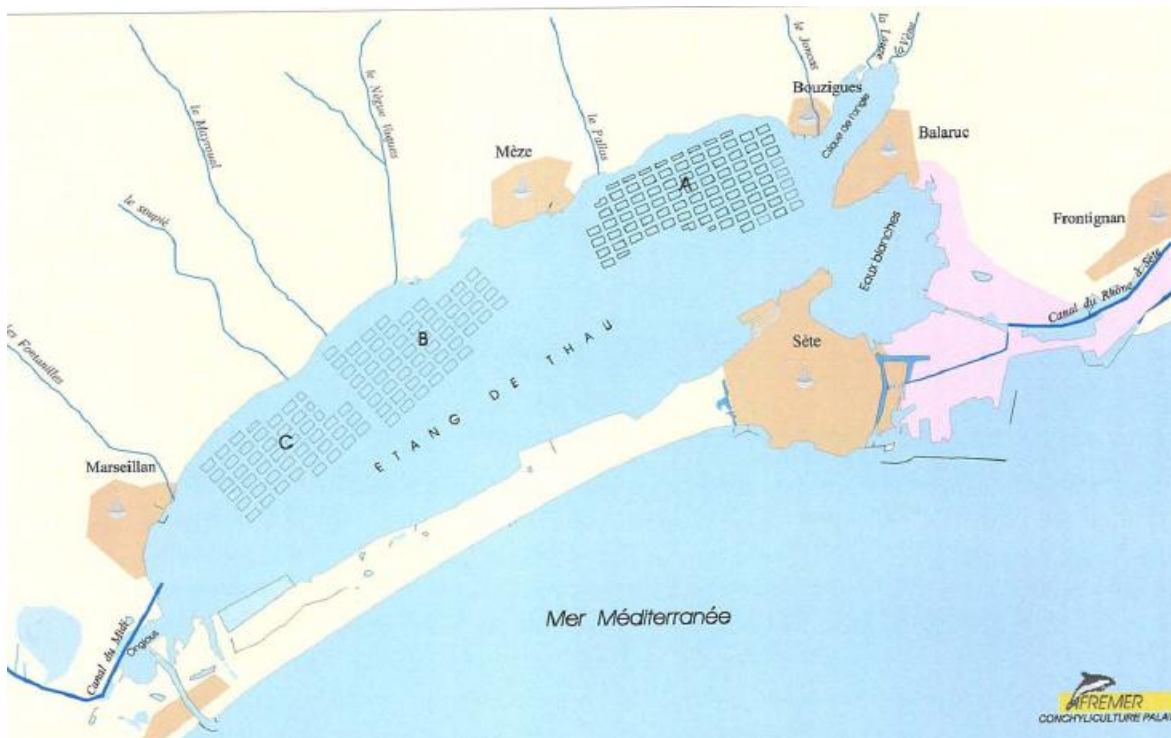


Figure 2: Carte de l'étang de Thau représentant les différentes rivières ainsi que les zones conchylicoles A, B et C.

L'eau de l'étang est salée, la salinité étant en moyenne comparable à celle de la mer 35 sur une année. Mais les communications avec la mer, la forte évaporation, la faible arrivée d'eau douce engendrent de fortes variations saisonnières. Les valeurs extrêmes se situent à 27 pour le minimum et 40 pour le maximum (Audouin 1962). Plusieurs facteurs interviennent dans ces variations. En été et en automne, l'absence de pluie et/ou la forte évaporation augmentent la concentration en sels. Celle-ci diminue en hiver et au printemps pour les raisons inverses, températures moins fortes et précipitations abondantes. (Tournier et al. 1981) En ce qui concerne l'insolation, l'étang de Thau reçoit une insolation moyenne mensuelle qui croît de janvier à juillet et décroît ensuite. On considère ici une valeur de l'insolation en été de 100 watt m^{-2} en moyenne, et en hiver une moyenne de 50 watt m^{-2} . (Plus et Al. 2003)

2.2 Caractéristiques atmosphériques.

Toute l'année l'étang de Thau subit l'influence du vent. On observe peu de jours parfaitement calmes. La vitesse moyenne annuelle est de 4.5 m.s^{-1} (Audouin 1962). On trouve 4 vents dominants sur le bassin de Thau. Le Tramontane souffle du Nord / Nord-Ouest (325°). Le Mistral du Nord-Est (45°), le Marin du Sud-Est (110°) et le Labech de l'Ouest (290°). Le Tramontane est le plus fort et le plus fréquent. Il est caractérisé par la soudaineté de son apparition. Sa vitesse atteint souvent 10 à 15 m.s^{-1} avec des pointes à plus de 20 m.s^{-1} . Le Tramontane représente 27.8% de l'activité éolienne sur le bassin de Thau. (Audouin 1962). Le vent d'Ouest représente 18% de l'activité éolienne, le Mistral représente environ 15% et le Marin représente 7.8% de l'activité éolienne. Ces événements atmosphériques durent généralement 72h avant de changer d'orientation. Les vents restants sont plus faiblement représentatifs et de part leurs faibles fréquences jouent donc un rôle beaucoup plus faible voire négligeable sur la courantologie de l'étang de Thau. Car c'est bien le rôle du vent sur ce bassin : induire des courants caractéristiques en fonction du secteur de provenance.

2.3 Caractéristiques des différentes sources anthropiques.

Comme dit précédemment, la lagune de Thau reçoit de part et d'autre des rivières majoritairement un enrichissement en matière organique, Azote, Phosphore ou autres substances chimiques. L'apport anthropique de chaque rivière est fortement dépendant de leur bassin de drainage mais pas seulement. Dans la plupart de ces affluents se déverse les eaux usées des agglomérations bordant le bassin. Ces agglomérations ont une croissance de population pouvant atteindre 300% pendant la saison estivale. Les stations d'épurations en amont sont dans bien des cas incapables de débarrasser complètement les eaux usées de leurs matières organiques, et se jettent donc directement dans le bassin. Nous considérons dans cette étude 4 sources. Tout d'abord la source au Nord-Est du bassin, la Vène (station 1) qui est le lieu de déversement d'une station d'épurations de lagunes comme la station Mèze (station 2) un peu plus

au Nord-Ouest ainsi que la station Soupié (station 3) à l'Ouest. Enfin la station Lido sur la côte Sud de l'étang (station 4) rejette directement les eaux usées en provenance des logements, campings et des activités estivales. Une moyenne de 10 gN.m^{-3} est choisi comme apport en Azote dissous de chaque station d'après l'étude de Tournoud et Al, 2006.

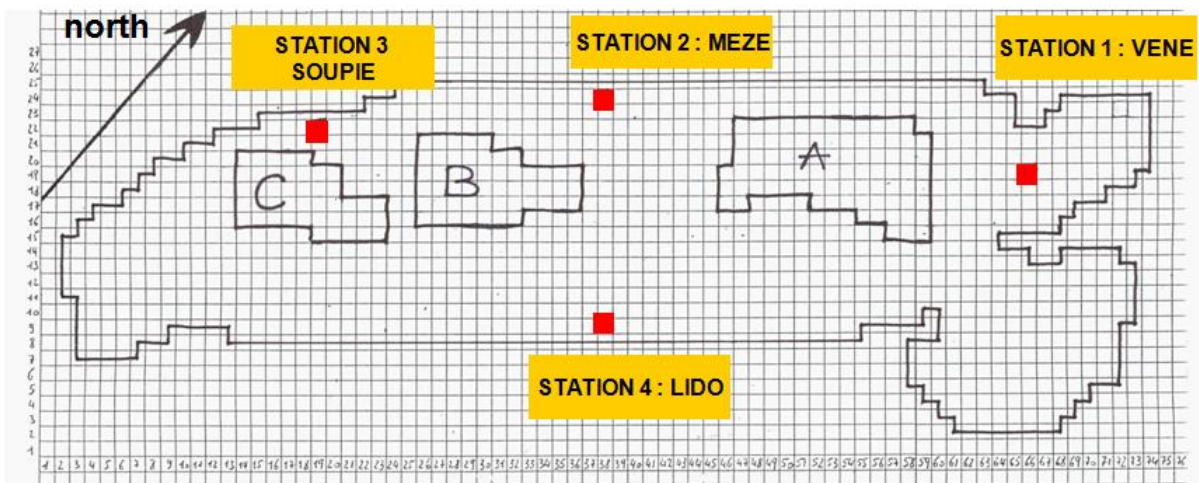


Figure 3: Carte de position des differentes sources de pollutions.

2.4 Conséquences des apports de matière organique.

La principale conséquence d'apport organique est une crise dystrophique. C'est un processus au cours duquel les relations habituelles entre le milieu et les organismes qui y vivent sont brutalement modifiées. La lagune de Thau est soumise régulièrement à ces crises qui sont en réalité des crises anoxiques ("malaïgues" en occitan), dont la cause est liée à l'eutrophisation de l'eau. L'accumulation de matières organiques endogènes (production primaire associée notamment aux macroalgues, biodépôts des élevages conchylicoles) ou exogènes (apports du bassin versant) conduit à accroître la consommation d'oxygène par les bactéries hétérotrophes. De ce fait, des périodes de désoxygénation voire d'anoxie apparaissent et débouchent sur l'intensification du processus de sulfato-réduction, conduisant à la production d'hydrogène sulfuré. L'anoxie et la présence d'hydrogène sulfuré constituent un environnement ostil pour la majorité des espèces vivant dans l'étang, dont les coquillages exploités qui subissent des mortalités importantes. Les conchyliculteurs voient leurs productions gravement endommagées ou même exterminées durant ces crises. Les activités touristiques subissent aussi des désagréments, couleur de l'eau (opaque due à la croissance des bactéries photosynthétiques sulfato-oxydantes), l'odeur nauséabonde de l'eau (présence d'hydrogène sulfuré, toxique à haute concentration), la présence de nombreux organismes morts à la surface du bassin, etc. Les crises anoxiques ne sont pas les seules conséquences, un apport en azote favorise la croissance des bactéries qui peuvent être toxiques pour l'être humain. Les ventes de coquillages sont donc stoppées. L'état français et l'Union européenne fixent des concentrations microbiologiques seuil à partir desquelles la baignade ou la consommation de produit issu de l'étang sont légalement interdites. Dans la plupart des cas, si l'activité touristique est touchée, l'activité conchylicole l'est aussi, et vice versa.

3 Matériels et méthodes.

3.1 Le modèle.

La circulation des eaux sous le seul effet du vent dans le bassin de Thau est simulée par un modèle numérique bidimensionnel horizontal. Bidimensionnel car la faible profondeur de l'étang ne justifie pas l'utilisation d'un modèle tridimensionnel qui engendrerait plusieurs masses d'eau dans une colonne d'eau de 4.5 m en moyenne. L'IFREMER utilise aujourd'hui un modèle tridimensionnel pour les zones de lagunes, mais intègre généralement les sorties sur la hauteur pour obtenir des données 2D bien plus parlantes et suffisamment justes. Le modèle utilisé est dû à Leendertse (1970) et Leendertse et al. (1971). C'est un modèle de type ADI (Alternate Direction Implicit) permettant de calculer les élévations du plan d'eau et les vitesses moyennes sur toute la profondeur. Les conditions aux limites du modèle ont été adaptées au bassin de Thau, totalement fermé et soumis au seul forçage du vent. Plusieurs types de traitement sont utilisés pour permettre de décrire une typologie probabiliste de la circulation des masses d'eau dans le bassin.

L'étude du comportement dynamique d'une masse d'eau passe par la résolution des équations du mouvement (de Navier-Stokes) et de l'équation de continuité. Le bassin étant supposé très peu profond, on néglige les mouvements verticaux. Cependant on considère que la lagune est non stratifiée, de densité constante et que les mouvements de la masse d'eau sont uniquement liée au cisaillement de surface dû aux vents. Malgré que le degré d'implication de la force de Coriolis soit faible, elle n'a pas été négligée dans cette étude. Par contre les termes de viscosité turbulente oui, car ils sont négligeables face aux phénomènes adjectifs. Quand à la viscosité turbulente verticale elle est utilisée à partir de la vitesse moyenne sur la verticale et du coefficient de Chézy (coefficient de résistance aux parois). Grâce à ces différentes approximations on obtient les équations à résoudre suivante :

$$\frac{\delta U}{\delta t} + U \frac{\delta U}{\delta x} + V \frac{\delta U}{\delta y} - fV + g \frac{\zeta}{\delta x} - \frac{\tau sx}{\rho H} + \frac{\tau fx}{\rho H} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} + U \frac{\delta V}{\delta x} + V \frac{\delta V}{\delta y} + fU + g \frac{\zeta}{\delta x} - \frac{\tau sx}{\rho H} + \frac{\tau fx}{\rho H} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\delta \zeta}{\delta t} + \frac{\delta(HU)}{\delta x} + \frac{\delta(HV)}{\delta y} = 0 \quad (3)$$

Avec :

- U représentant la composante zonale du courant (m.s^{-1}), V la composante méridienne du courant (m.s^{-1}), toutes deux intégrées et moyennées sur la verticale,
- τsx et τsy sont les composantes selon les deux directions horizontales du cisaillement de surface,

$$\tau sx = C_D \cdot \rho_a \cdot W^2 \cdot \sin A_z$$

$$\tau sy = C_D \cdot \rho_a \cdot W^2 \cdot \cos A_z$$

avec ρ_a la masse volumique de l'air (kg.m^{-3}), C_D le coefficient de frottement du vent et A_z la direction du vent, W la vitesse du vent,

- τsfx et τsfy sont les composantes selon les deux directions horizontales du cisaillement de fond.

$$\tau sfx = \frac{\rho \cdot g \cdot U (U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2}$$

$$\tau sfy = \frac{\rho \cdot g \cdot V (U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2}$$

- $f = 2 \cdot \omega \cdot \sin \alpha$ le terme de Coriolis avec ω la vitesse angulaire de rotation terrestre, α la latitude,
- C le coefficient de Chézy,
- ζ l'élévation du plan d'eau par rapport au niveau d'origine au repos,
- H la profondeur totale de la tranche d'eau,
- ρ la densité de l'eau (considérée constante),
- g l'accélération de la pesanteur.

Il est important de préciser que ce rapport ne traitera pas de la mise en place de ce modèle mais uniquement de traitement des données qu'il produit.

Pour être résolues grâce au modèle, les équations précédentes ont été discrétisées. Le programme du modèle lui à été écrit en fortran par Mr Millet (1989). Ce script est compilé pour générer différents fichiers de données qui seront lues par le programme Matlab© qui permettra une lecture graphique. Différents programmes sont disponibles pour l'utilisateur afin d'obtenir des cartes de répartition du phytoplancton dans le bassin de Thau ainsi que la répartition des concentration en matière organique dissoute (DIN).

Afin de pouvoir paramétrer à notre guise le modèle, l'auteur à mis en place un fichier 'paramètre' qui permet à l'utilisateur de mettre en place ces propres paramètres. Il est alors possible de modifier la durée de la modélisation, la direction du vent, la température de l'eau, l'insolation, l'emplacement des sources de pollution, d'activer ou désactiver l'activité biologique. Les détails du fichier de paramètres se trouvent dans le Table 2 en annexe.

3.2 Activité physique et Biologique du modèle.

L'étang de Thau est représenté par une grille de 2052 mailles de 250m de cotés. Sur chaque maille, il est possible de mettre en place deux methodes de calcul de la concentration en azote dans l'eau au cours du temps :

Modèle physique Ici, est pris en compte uniquement l'effet des vents sur la surface de l'étang. Ces vents causes la mise en mouvement de la masse d'eau et varie en fonction de l'orientation de vent. Les polluants emis dans le bassin sont donc transporté par les courants et ne subissent aucune autres modifications. Il est alors possible de voir sur chaque maille l'evolution de la concentration en azote au cours du temps.

Modèle Biologique Dans ce cas, en plus du modèle physique, il est tenu compte de l'activité biologique du bassin. Le developpement de la production primaire est calculé à partir d'équations extraite de l'article C. Bacher (1997). Ces équations sont sous la forme d'une loi de Steele et un terme de limitation par la concentration en sels nutritifs a été rajouté sous la forme d'une équation de Michaelis-Menten. Les équations font intervenir la température, la porosité du sédiment, le coefficient d'extinction de la lumière, le coefficient de diffusion a l'interface eau/sédiment, la biomasse des filtreurs, leur taux d'excrétion dissoute et d'assimilation du phytoplancton.

Pour la production et la mortalité du phytoplancton on a ces équations :

- Production = $p_{max}.e^{0.0693}.temp.F.(wnut/(Km + wnut)).phyto$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
avec 'pmax' le maximum de croissance du phytoplancton, 'temp' la température de l'eau, 'F' le facteur limitant induit par la disponibilité de la lumiere dans la colonne d'eau, 'wnut' la concentration en Azote, 'Km' la constante de Miskaelis-Menten et 'phyto' la concentration en phytoplancton au temps t.
- Mortalité = $tm.e^{0.0693}.temp.phyto$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
Avec 'tm' le taux de mortalité du phytoplancton.

Ensuite la présence d'organismes filtreurs engendre une prédation du phytoplancton etablie par les équations suivante :

- Filtration = $kfiltr.e^{0.0693}.(temp-20).stock/Volume.phyto$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
Avec 'kfiltr' le taux de filtration des organismes filtreurs, 'stock' le stock d'organismes filtreurs pour chaque maille et 'Volume' le volume de chaque maille.

Ces même organismes filtreurs créé aussi de la matière organique et de la biodeposition qui sont calculés à partir des équations suivante :

- Excretion = $kexcr.e^{0.0693}.temp.filtration$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
Avec 'kexcr' la constante d'excretion des organismes filtreurs (=0.01).
- Biodéposition = $(1-kcons).filtration$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
Avec 'kcons' la fraction d'assimilation des organismes filtreurs (=0.4).

La matière organique déposé par la sedimentation du phytoplancton mort, l'excretion et la biodeposition des organismes filtreurs est remineralisé par des bacteries presente dans les sediments qui à l'aide de l'oxygene transforme l'Azote mineral en Azote dissous, calculé en fonction de l'équation suivante :

- Mineralisation = $tmin.e^{0.0693}.temp.detroit$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
Avec 'tmin' le taux de mineralisation.

Une fois remineralisé, l'azote dissous est rediffusé dans la colonne d'eau en fonction de l'équation suivante :

- Diffusion = $ks.[(snut/hs.po)-wnut]$ en $gN.m^{-3}.d^{-1}$.
Avec 'ks' le coefficient de diffusion (=0.07m.d⁻¹), 'snut' la concentration en Azote dans les sédiements en fonction du temps, 'hs' la hauteur de sediments considérée (=0.05m), 'po' la porosité du sediments (=0.77) et 'wnut' la concentration en Azote dans la colonne d'eau à chaque pas de temps.

L'évolution des polluants dans l'étang de Thau varie dans ce modèle en fonction du resultat de chaque equations appliqué sur chaque maille (qui ont un volume connuent) au cours du temps. Le modèle recalcul les concentrations des differentes valeurs toutes les 360 secondes. Cumulé au modèle physique, on obtient des cartes de concentrations en azote en fonction des courants induits par les vents0

3.3 Déroutement de l'analyse.

Nous savons que l'étang de Thau est pollué par 4 sources distinctes et subit 4 orientations de vent différents. Dans le cadre de ce rapport, nous allons étudier comme suit uniquement une des ces stations sous l'effet d'un seul vent. La restriction à une seule orientation de vent et à une seule source de pollution fut obligatoire pour respecter les consignes de rédaction, car après avoir fait fonctionner le modèle j'obtiens plus de 40 cartes de données brutes différentes, impossible à traiter en 15 pages.

Le choix du vent est une question de fréquence, la Tramontane apparait 27.8% du temps, soit plus de 100 jours par an, c'est donc ce vent que j'ai logiquement choisi. Pour le choix de la station à étudier j'ai choisi la source de pollution la plus caractéristique et qui présente le plus de similarité avec les autres stations qui ne seront pas traitées afin d'avoir tout de même une idée de ce qu'il s'y passe. J'ai aussi attaché de l'importance à choisir une source qui touche un maximum de cote et de zone conchylicoles.

Ce rapport se concentrera donc sur l'effet de la Tramontane (Nord-Ouest = 325°) sur la circulation de polluant originaire de la Vène (station 1) dans l'étang de Thau en fonction des étapes suivantes :

Première étape Etape uniquement courantologique qui va être l'interprétation des structures hydrodynamiques induite par le vent. Pour chaque maille du modèle il pourra être calculé la surélévation ou l'abaissement par rapport au niveau sans vent.

Deuxième étape Rendre une source de pollution active pour une station de mon choix et voir l'évolution des polluants en fonction du vent.

Troisième étape Identique à la deuxième mais il sera aussi tenu compte de l'activité biologique du bassin, croissance, mortalité du phytoplancton, filtration, excrétion et biodéposition des organismes filtreurs, ainsi que la minéralisation et la diffusion à l'interface sédiment-masse d'eau.

Quatrième étape Pour mieux comprendre l'effet des principaux forçages sur le modèle, j'ai effectué une étude de sensibilité en faisant varier les paramètres de températures, d'insolation et de stock d'organismes filtreurs de 20% en 20% pour une variation maximale de +/- 80%. Les résultats fourniront des indications sur les forçages les plus influents sur l'évolution des concentrations en azotes dans l'étang de Thau.

4 Résultats.

4.1 Première étape.

4.1.1 Courantologie induite par le vent de Nord - Ouest : la Tramontane.

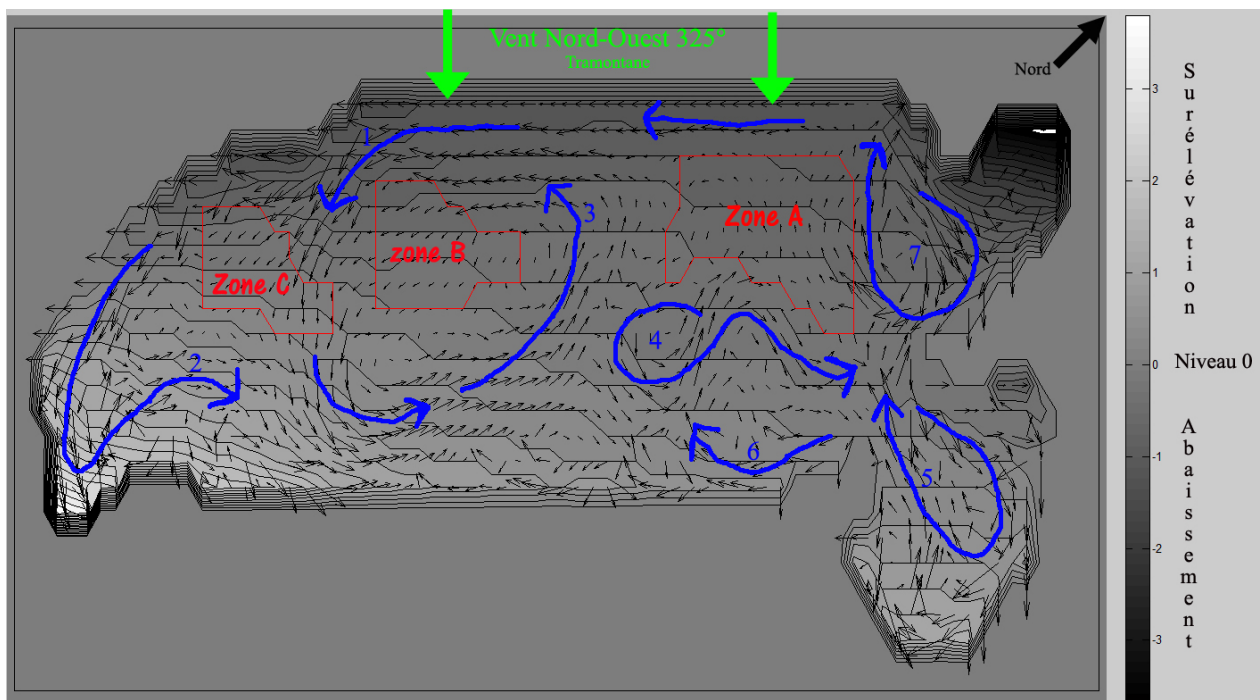


Figure 4: Carte courantologique des courants de l'étang de Thau induit par la Tramontane (325°). En bleu se trouvent la direction des principaux courants numérotés.

Sur cette carte nous voyons qu'un vent de N-O engendre un courant Sud qui longe la côte Nord et Ouest (1) du bassin tout en étant dévié entre les zones B et C ou fortement atténué en les traversant. Un courant longeant la côte Sud jusqu'à la moitié du bassin est observable (2) celui-ci remonte ensuite direction Nord en passant entre les zones A et B ce qui provoque un 'tourbillon' autour de la zone B (3). Au Sud de la zone A on constate la présence d'un tourbillon cyclonique induit par la présence de la zone A (4). Dans la zone des Eaux Blanches, l'eau effectue un circuit anticyclonique pour ressortir en direction du Nord en longeant la côte Est du bassin (5) ou bien, en plus faible intensité, en direction de l'Ouest du bassin en longeant la côte Sud (6). Enfin un tourbillon anticyclonique se met en place dans le crique de l'Angle (7).

On constate aussi clairement une accumulation d'eau dans la partie Sud du bassin avec des surélévations de plus de 3 cm par rapport à un niveau 0 (lorsqu'il n'y a pas de vent). Alors que dans la partie Nord il y a un abaissement de plus de 3 cm. L'accumulation d'eau se fait donc à l'extrémité opposée du bassin ou arrive le vent.

4.1.2 Conclusion

Grâce à la carte précédente il est évident que la direction du vent joue un rôle prépondérant dans le courantologie de l'étang de Thau. De plus la position des différentes zones conchylicoles, qui sont de véritable barrages induisent de nombreux systèmes tourbillonnaire, notamment autour de la zone B. Il est alors facile de se dire que certaines zones seront nettement plus favorables à l'accumulation de pollution que d'autre. C'est ce que nous allons découvrir par la suite.

4.2 Deuxième étape.

4.2.1 Activation de la source de pollution station 1 et observation des déplacements.

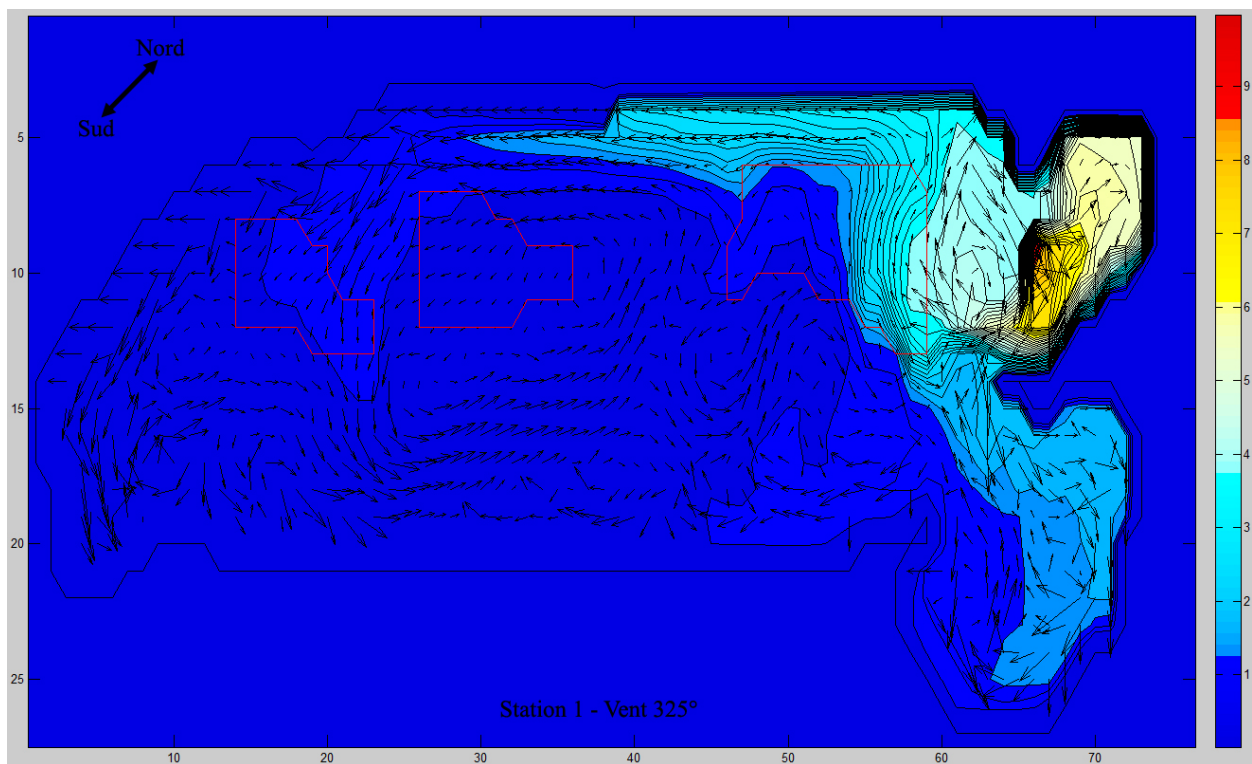


Figure 5: Carte de propagations d'une pollution arrivant de la Station 1 après 72H de vent de 325°

La pollution provenant de la Vène touche principalement la zone conchylicole A avec les plus fortes concentration en polluant dans la partie Est de la zone avec 4 gN.m^{-3} en maximum et les plus faibles dans la partie Sud-Est avec 1 gN.m^{-3} comme minimum. La zone B est aussi impacté mais avec des concentration maximal nettement inférieur à la zone A, inférieur à 1 gN.m^{-3} , du à la présence d'un tourbillon qui entraine les eaux plus loin en direction du bord Ouest du bassin. En ce qui concerne la zone C qui se trouve justement à l'Ouest, les concentrations en polluant sont plus faibles que la zone A et légèrement plus élevés que la zone B, de l'ordre de 1.2 gN.m^{-3} . Cette zone joue aussi le rôle de barrage en empêchant les polluants d'aller plus au sud.

Les côtes de Balaruc sont les plus touchées par la pollution avec les concentrations les plus fortes. Les courants entrainent ensuite les polluant dans la crique de l'Angle et c'est la que l'on trouve la plus grande zone d'accumulation

avec jusqu'à 8 gN.m^{-3} , du à un tourbillon qui concentre les polluants dans cette zone. Le courant qui sort de ce tourbillon fortement pollué, engendre une pollution le long des côtes de Bouzigues allant en direction de Mèze ou la concentration diminue au plus on s'éloigne vers l'Ouest. En descendant vers le Sud, dans l'étang des eaux blanches, les côtes Est sont le plus impacté à cause de la présence de courant qui les accumulent dans cette partie. Enfin on détecte aussi une légère pollution de la côte Sud de l'étang jusqu'à après Sète, cela correspond au déplacement de la masse d'eau à la sortie de l'étang des Eaux Blanches. Quand à la partie Sud-Ouest du bassin, elle est beaucoup plus faiblement contaminé à cause des courants d'Ouest qui arrive à contre sens et empêche les polluants d'y parvenir complètement.

4.2.2 conclusion

Cette carte nous montre clairement que les polluants suivent parfaitement le courant engendré par le vent et cause ainsi l'accumulation dans certaine partie de l'étang alors que d'autres sont juste soumise au passage de courant pollué. Ou bien encore des zones protégées par des courants inverses à ceux pollués ou des zones trop éloignées de la source empêchent ainsi les polluants d'y parvenir. En observant les cartes de répartitions avec d'autres vents fréquents, on remarque que les différentes côtes polluées par la tramontane le sont en faite aussi par d'autres vent. Et des côtes non polluées le deviennent. Par exemple, Balaruc est touché par la pollution lorsque la station 1 est active dans 70% du temps, soit plus de 255 jours par an.

4.3 Troisième étape.

4.3.1 Activation de la biologie pour la station active et un vent de Tramontane (NE - 325°)

Dans cette étape nous activons la biologie du bassin de Thau défini précédement. Après 72H de vents, d'émission de d'Azote par la Vène et d'activité biologique on s'aperçois qu'il y a de l'azote uniquement à l'emplacement de la source de pollution avec une concentration maximale au point de source. Alors que lorsque la biologie n'est pas prise en compte on en trouve dans une plus grande partie du bassin (Figure 13) et en plus forte concentration. Sachant que l'azote est une source de nourriture pour le phytoplancton, l'azote est certainement consommé par celui-ci. Une carte de la concentration en phytoplancton répondra à cette question.

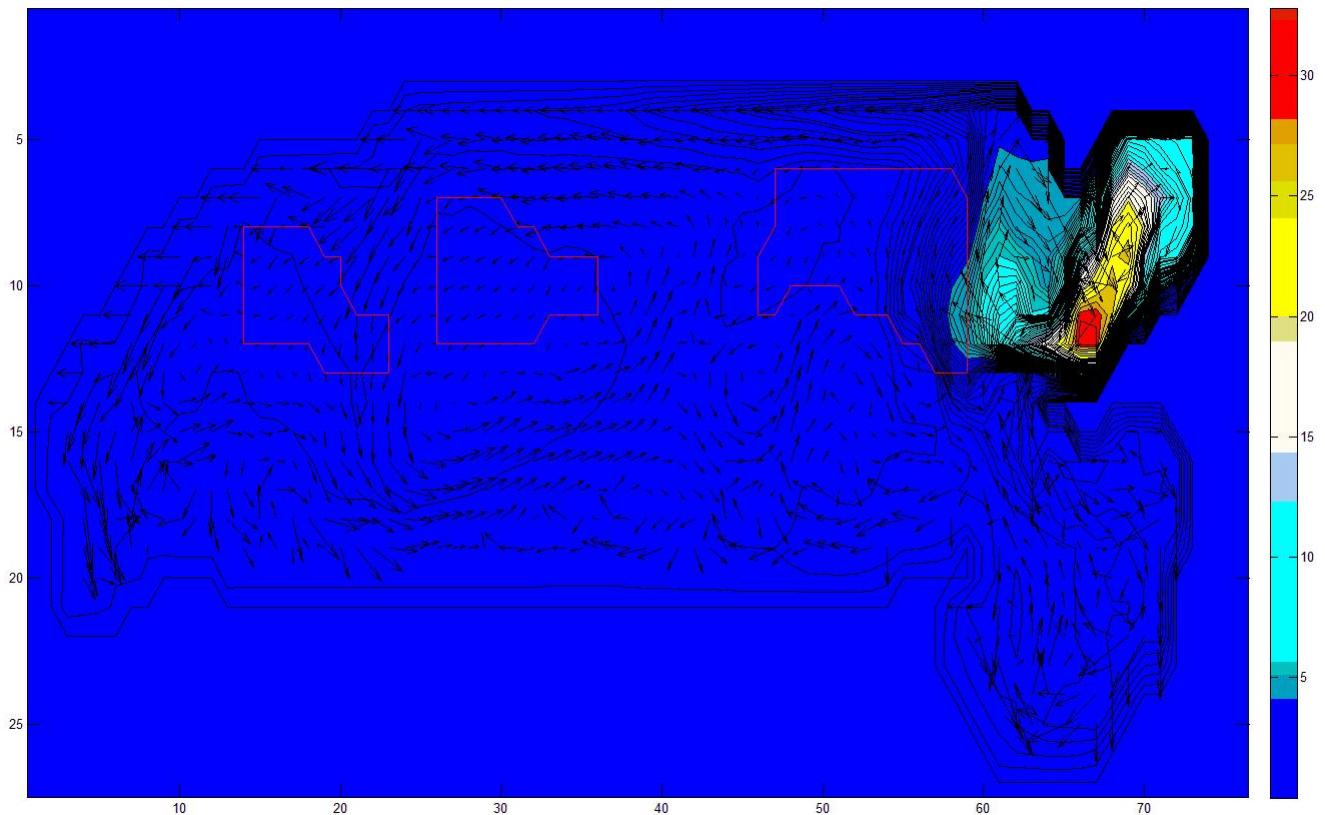


Figure 6: Carte de concentration en phytoplancton après 72H de vent de 325° lorsque la biologie est prise en compte (saison été).

Cette carte (figure 5) de la concentration en phytoplancton en été avec une température de 20°C et une inso-

lation de 100 W.m^{-2} nous explique la carte de répartition en Azote dissous dans le bassin de Thau. On se rend compte qu'il y a un bloom phytoplanctonique légèrement décalé au Sud de la source de pollution. Ce déplacement est du au vent qui induit un courant Sud et déplace la masse d'eau, mais ce même courant permet aussi une dispersion de phytoplancton vers l'Est dans le crique de l'Angle et dans des concentrations plus faible en direction du Nord. On distingue aussi clairement un resserrement des isolignes dans la zone conchylicole A, qui s'explique par la consommation du phytoplancton par les organismes filtreurs ce qui fait décroître rapidement la concentration. La consommation de d'Azote dissous permet au phytoplancton de se multiplier et empêche donc ainsi l'expansion de la pollution que nous constatons lorsque la biologie est inactive (Figure 4).

En observant l'évolution des concentrations en phytoplancton dans le temps on se rend compte qu'au début de la série temporelle la concentration est uniforme dans le bassin avec une absence de phytoplancton dans les zones conchylicoles du fait de la prédation. Rapidement la concentration deviens nul dans la partie Ouest du bassin pour rester importante dans la partie Est, autour de la source. On remarque aussi un cycle de croissance et diminution des concentrations au sein d'une même journée. Ceci s'explique car le phytoplancton est un organisme photosynthétique qui à besoin de la lumière pour se développer et donc la nuit on constate un arrêt de la production. Les concentration diminue même car les filtreurs continu des les consommer. Malgré que la lumière rentre en jeu toutes les 12h, les concentrations sont de plus en plus faibles après chaque cycle jour/nuit. Engendré par le fait que les organismes filtreurs consomment la production primaire au cours du temps ce qui tend à faire diminuer la concentration sur le long terme. Enfin le modèle me permet de constater une concentration en matière détritique et en Azote dans les sédiments seulement dans la parti Est de la zone conchylicole A et au niveau de la plus forte production de phytoplancton qui s'explique par la biodéposition des organismes filtreurs et la sédimentation du phytoplancton mort. Mais sur une échelle temporelle de 72H, les concentrations dans les sédiments sont très faibles, c'est a dire qu'il y a une forte réminéralisation de la matiere organique.

Lorsque l'on effectue la modélisation dans des conditions hivernales (7° C et une isolation de 50 W.m^2) on observe des choses complètement différentes. Le phytoplancton ne se développe pas immédiatement et quand ce produit, ce n'est pas au niveau de la source mais surtout dans les courants les plus forts de l'étang (courant qui transporte l'Azote en provenance de la Vène). Les concentrations sont cependant au minimum 10 fois plus faible qu'en été au bout de 72H et varie toujours toutes les 12h en fonction de la présence ou l'absence de lumière. De plus les zones conchylicoles restent toujours vides de phytoplancton (prédation). Par contre la matière détritiques augmente au cours du temps surtout dans les zones conchylicoles. Ceci peut expliquer l'augmentation de la concentration en phytoplancton de plus en plus importante au cours du temps, car contrairement à l'été, les sédiments contiennent un stock d'azote plus important et qui va être reminéralisé plus lentement permet ainsi un apport supplémentaire à l'apport de la Vène engendrant ainsi un accroissement de la production primaire durant la journée.

4.3.2 conclusion

L'activation de la biologie dans le modèle fait énormément varier les concentrations en Azote dans l'étang de Thau. En été, les concentrations sont faibles dans tout le bassin sauf au niveau de la source de pollution. Ceci s'explique par la consommation de cet azote par le phytoplancton qui en à besoin pour sa croissance. Ces consommations alliées à des conditions de température et d'insolation optimale permettent un développement important autour de la source. Le phytoplancton est ensuite transporter par les courants mais est rapidement consommé par les filtreurs. L'accumulation d'Azote organique dans les sédiments sont rapidement renvoyés dans la colonne d'eau par la reminéralisations permettant ainsi aucun stockage d'azote dans les sédiments. En été le bassin est très actif biologiquement parlant. Il y a donc une forte utilisation d'oxygène, et c'est durant les périodes estivales que les risques de crise anoxique sont les plus fréquentes.

En hiver par contre ce n'est pas la même chose, les concentrations en phytoplancton sont beaucoup plus faible, le développement se fait dans tout le bassin, pas uniquement proche de la source. Par contre il y a un plus important stockage de l'azote dans les sédiments. En hiver l'activité biologique du bassin fonctionne comme au ralenti. L'oxygène ne devient pas manquant, mais lorsque le printemps arrive avec des températures plus clémentes pour le développement de l'activité microbiennes, des crises anoxiques sont probable du fait de la forte disponibilité d'Azote dans les sédiments.

4.4 Quatrième étape.

4.4.1 Etude de sensibilité du modèle à la température

Dans cette étude je suis partie d'une condition de température et d'insolation initiale en été (20° C et 100 W.m^{-2}). En faisant varier uniquement la température de -80% à $+80\%$ on se rend compte que la concentration en Azote est inversement proportionnelle à la concentration en phytoplancton. Plus la température augmente, plus la concentration en phytoplancton augmente alors que la concentration en Azote diminue. Cependant on constate une accélération de la diminution de la concentration en Azote jusqu'à des températures de 32° C , après, les variations sont beaucoup plus faibles. Ce qui s'explique par le fait que le phytoplancton a plus de difficulté à se développer

dans des eaux trop chaude (ou trop froide). Par contre, le modèle n'autorise pas des valeurs de phytoplancton pour des températures d'eaux supérieures à 28 °C car au-delà j'obtiens une erreur du programme. Dans tout les cas, les données recueillis sont suffisantes pour conclure que la température joue un rôle important dans les forçages du modèle car la concentration en azote est fortement liée à la température de l'eau (variation totale d'Azote de 62692 g)

Table 2: Cumule des concentrations en Azote et en Phytoplancton totales dans tout le bassin de Thau durant une période de 72H avec un vent de NE - 325 ° et la station Vène activé en faisant varier la température de -80% à +80%.

Variation de T ° (en %)	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
T ° (en °C)	4	8	12	16	20	24	28	32	36
[N] _{Total} dans l'étang (en gN)	74388	58334	43458	33803	26948	22093	16755	12449	11696
[Phyto] _{Total} dans l'étang (en gN)	37232	50212	61162	66499	69648	73105	83386	—	—

4.4.2 Etude de la sensibilité du modèle à l'insolation.

Ici, l'insolation varie de -80% à +80% avec une température de l'eau fixé à 20 °C et une insolation initiale de 100 W.m⁻². Comme dans le cas de la température, une augmentation de l'insolation engendre une croissance du phytoplancton ce qui cause une diminution de l'Azote dans l'étang. On remarque aussi des valeurs d'insolations où la croissance semble plus importante (jusqu'à 80 W.m⁻²), après l'accroissement de l'azote phytoplanctonique est plus faible et devient proportionnelle à l'insolation. En ce qui concerne l'Azote, la diminution est rapide jusqu'à 80 W.m⁻² et diminue très lentement si l'insolation continue d'augmenter. Ce qui correlle bien avec la consommation du phytoplancton qui devient de plus en plus importante.

L'insolation est aussi un forçage important dans le modèle car il fait fortement varier la concentration d'Azote dans l'étang (variation totale d'Azote de 74276 g).

Table 3: Cumule des concentrations en Azote et en Phytoplancton totales dans tout le bassin de Thau durant une période de 72H avec un vent de NE - 325 ° et la station Vène activé en faisant varier l'insolation de -80% à +80%.

Variation de T ° (en %)	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
Insolation (en W.m ⁻²)	20	40	60	80	100	120	140	160	180
[N] _{Total} dans l'étang (en gN)	94274	61358	39840	31249	26948	24523	22705	21209	19998
[Phyto] _{Total} dans l'étang (en gN)	13686	38315	55319	63514	69648	74997	79492	83697	86821

4.4.3 Etude de la sensibilité du modèle au stock de mollusque disponible.

Dans ce cas le stock de mollusque varie de -80% à +80% dans des conditions de température et d'insolation estivale (20 °C et 100 W.m⁻²). On s'aperçois alors que plus le stock de mollusque augmente plus la quantité de phytoplancton diminue, ce qui correspond à une augmentation de la prédation. Ensuite on remarque aussi une augmentation de la concentration en Azote dans le bassin, ce qui s'explique par une diminution de l'utilisation de celui-ci par le phytoplancton qui est filtré par les mollusques. Cependant les variations sont très faible (variation totale de l'azote de 1327).

Le forçage du au stock de mollusque n'est pas prépondérant dans le modèle et une variation même importante ne cause pas de changement significatif sur la concentration en Azote dans l'eau de l'étang de Thau.

Table 4: Cumule des concentrations en Azote et en Phytoplancton totales dans tout le bassin de Thau durant une période de 72H avec un vent de NE - 325 ° et la station Vène activé en faisant varier les stock de mollusques de -80% à +80%.

Variation de T ° (en %)	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
Stock des organismes filtreurs (en gdw)	2	4	6	8	10	12	14	16	18
[N] _{Total} dans l'étang (en gN)	26349	26487	26632	26785	26948	27121	27301	27487	27676
[Phyto] _{Total} dans l'étang (en gN)	78205	75689	73446	71438	69648	68051	66602	65291	64080

4.4.4 Conclusion

Après étude de l'impact des différents forçages sur le modèle, on se rend compte que c'est l'insolation qui présente la plus grande sensibilité car c'est ce facteur qui fait varier le plus fortement la concentration en Azote dans l'étang par la biais de l'accroissement du phytoplancton. Viens ensuite la température qui présente aussi une sensibilité importante mais légèrement plus faible que l'insolation. Enfin, le stock de mollusque n'est pas un forçage sensible du modèle car une variation de celui-ci fait varier que très faiblement les concentrations en Azote dans le bassin de

Thau.

Le modèle répond très favorablement à la variation de l'insolation et de la température qui sont à la base de la croissance du phytoplancton.

5 Discussion

Lorsqu'on applique un vent de Nord - Ouest de 325° sur le bassin de Thau, on obtient une carte courantologique caractéristique du bassin. En ajoutant un flux continu d'Azote (ou autre polluant) on peut de suivre l'évolution de cette pollution au cours du temps à travers l'étang en fonction des différents courants qui se mettent en place et de l'activité biologique du bassin. On se rend alors compte que la concentration en Azote est proportionnelle à la concentration en phytoplancton. Plus la biomasse phytoplanctonique augmente au cours du temps, plus les concentrations en Azote diminuent. Après étude de la sensibilité du modèle, on conclut que l'insolation qui arrive sur ce bassin est le principal forçage, c'est lui qui a le plus gros impact sur l'évolution des concentrations en Azote dans le bassin car c'est un facteur de croissance du phytoplancton. Plus l'insolation est forte, plus l'activité biologique est importante et donc moins il y a d'Azote dans l'étang. La température de l'eau joue le même rôle mais légèrement plus modestement.

On sait qu'une activité biologique importante cause une forte consommation d'oxygène par les organismes, de plus l'augmentation de température due à une intensification de l'insolation contribue à diminuer la solubilité de l'oxygène dans l'eau, limitant ainsi d'autant plus les échanges avec l'atmosphère. L'apparition de crise anoxique devient alors de plus en plus probable. On observe l'évolution de la concentration du phytoplancton dans le temps, on remarque que cela varie au cours d'une même journée avec un maximum en fin de journée et un minimum en fin de nuit. C'est en fin de nuit, lorsque une grande partie du phytoplancton est morte et se sédimente au fond du bassin que les crises sont majoritaires.

Sachant l'impact économique qu'une crise anoxique peut avoir, il semble logique lors d'épisodes de fort ensoleillement et de forte chaleur de diminuer au maximum les rejets d'Azotes. Malheureusement pour l'écosystème du bassin de Thau, ces épisodes arrivent généralement en été lorsque la population locale est augmentée de la population touristique, augmentant ainsi considérablement les eaux usées à traiter. Les stations d'épuration étant au maximum de leur capacité et/ou les eaux usées sont directement jetées dans le bassin, l'anticipation des crises anoxiques semble facile mais l'empêchement d'une crise beaucoup plus compliqué.

Un autre facteur important, les apports des stations d'épuration et autres pollueurs engendrent une augmentation importante des bactéries en suspension dans l'eau, qui selon l'espèce peuvent avoir des conséquences pour l'homme. En suivant l'évolution de ces polluants dans l'étang de Thau, il est possible de suivre les plages qui sont le plus touchées par cette invasion et ainsi prévenir à temps les baigneurs. Il est possible de procéder de la même façon pour prévenir les conchyliculteurs de toute pollution possible.

Dans l'objectif d'améliorer la prédiction des crises anoxiques il serait intéressant de rajouter au modèle des équations de consommation d'oxygène. Cumulé avec un meilleur placement des sources de pollution, il serait alors possible de réduire au maximum les impacts économiques.

De nombreuses associations luttent pour faire prendre conscience aux politiques de l'enjeu d'une meilleure gestion des eaux usées, et la lutte n'est pas finie, mais les associations se font largement entendre et les stations d'épuration, les voiries, et autres infrastructures sont continuellement améliorées.

6 References

- B. Millet. *Fonctionnement hydrodynamique du bassin de Thau. Validation écologique d'un modèle numérique de circulation (programme Ecothau)*. OCEANOLOGICA ACTA 1989 - VOL. 12 - No 1.
- M.-G. Tournoud et al. *Origins and quantification of nitrogen inputs into a coastal lagoon: Application to the Thau lagoon (France)*. Ecological Modelling, 2006.
- J. Audouin. *Hydrologie de l'Etang de Thau*. Rel. Tral. et Pêches maritime, 1962.
- M. Plus et al. *Modelling water discharges and nitrogen inputs into a Mediterranean lagoon. Impact on the primary production*. Ecological Modelling, 2006.
- M. Plus et al. *Modelling of oxygen and nitrogen cycling as a function of macrophyte community in the Thau lagoon*. Continental Shelf Research, 2003.
- C. Bacher, B. Millet, A. Vaquer. *Modélisation de l'impact des mollusques cultivés sur la biomasse phyto-planctonique de Thau*. Science de la vie, 1997.
- D. Banaru. *Cours OCE 102 - Océanographie Biologique*. Master d'Océanographie S1, 2012.
- P-Y. Hamon. *Modifications physico-chimiques dans l'étang de Thau de 1965 à 2000*. IFREMER, 2002.

7 Annexes.

Table 5: Détail du fichier paramètre.

Nom des paramètres	Description	Valeurs
maxst	Durée de la modélisation	en seconde (24h=8640)
nprint	Temps où les données sont enregistrées	en seconde
wind	Direction du vent	en degré (325, 290, 110 ou 45)
ipoll	Activité biologique	si 0 activité biologique activé, si 1 non
temp	Température de l'eau	en degré celsius
i0max	Irradiance maximal à la surface	en $w.m^{-2}$
stocka	Masse des filtreurs zone A	5.0e8
stockb	Masse des filtreurs zone B	2.5e8
stockc	Masse des filtreurs zone C	2.5e8
input1	Quantité de polluant déversé par la station Vene	en $gN.m^{-3}$
input2	Quantité de polluant déversé par la station Meze	en $gN.m^{-3}$
input3	Quantité de polluant déversé par la station Soupie	en $gN.m^{-3}$
input4	Quantité de polluant déversé par la station Lido	en $gN.m^{-3}$
nc1mc1	Position de la station Vene	Position X,Y de la maille
nc2mc2	Position de la station Meze	Position X,Y de la maille
nc3mc3	Position de la station Soupie	Position X,Y de la maille
nc4mc4	Position de la station Lido	Position X,Y de la maille
inputA	Temps ou les polluant sont déversées	Si 1 = au début du jour
inputZ	durée de deversement des polluants	en seconde