

Étude de l'effet de l'aménagement du complexe hydroélectrique de la rivière Romaine sur les conditions biologiques et physiques du chenal de Mingan à l'aide d'un simulateur numérique tridimensionnel à haute définition



**François Saucier, PhD, Bruno Zakardjian, PhD,
Simon Senneville, MSc et Vincent Le Fouest, PhD**

**Institut des Sciences de la Mer
Université du Québec à Rimouski
Rimouski (Qc) G5L 3A1**

Mai 2007

No. réf. 37627-06002C
N° contrat-cadre : 4600011146
N°commande : 4501660429

Table des matières

1. Introduction.....	7
2. Méthode	10
2.1 Simulation numérique de la variabilité du milieu marin	10
2.2 Circulation générale.....	11
2.3 Pilotage à haute définition	12
2.4 Modèle de l'écosystème.....	13
2.5 Choix de la période de simulation	16
2.6 Production de scénarios	18
3. Circulation générale.....	19
3.1 Conditions océanographiques moyennes dans le chenal de Mingan.....	19
3.2 Variabilité saisonnière et de basse fréquence des conditions océanographiques ...	20
3.3 Variabilité tidale des conditions océanographiques.....	23
4. Production planctonique et effet de l'aménagement de la rivière Romaine	24
4.1 Production planctonique	25
4.2 Différences associées à l'aménagement de la rivière Romaine.....	27
4.3 Scénario de débit extrême en hiver.....	29
5. Conclusions.....	30
Remerciements.....	32

Table des figures

- Figure 1 : Carte : a) golfe et estuaire du Saint-Laurent (profondeur en m). La région d'étude du chenal de Mingan est encadrée. b) toponymie de la région d'intérêt 35
- Figure 2 : Bathymétrie et grilles numériques du domaine HD. Les axes sont en coordonnées latitude/longitude d'une part et en indices de la grille HD d'autre part (utilisés pour des références ultérieures). (a) Grille du modèle haute définition HD avec une résolution horizontale de 400 m (la résolution verticale est de 3 m près de la surface et 5 m en profondeur). La grille du simulateur régional REG avec 5 km de résolution horizontale est montrée en rouge. Les points rouges correspondent à des positions de contrôle entre les simulateurs REG et HD. Le sous-domaine du chenal de Mingan est délimité par le trait pointillé; (b) Profondeurs en m de la grille HD obtenues en interpolant les sondages bathymétriques du Service Hydrographique du Canada ; (c) Profondeur en m de la grille du simulateur REG, montrant la faible résolution des complications topographiques de la région d'étude. 36
- Figure 3 : Schéma de la stratégie de pilotage du simulateur HD à partir du simulateur REG. À l'étape 1, le simulateur du golfe du Saint-Laurent est exécuté pour l'année 2001 en utilisant les contraintes suivantes: les conditions océaniques aux détroits de Belle-Isle et de Cabot (marées, température, salinité, sels nutritifs, provenant du programme de monitoring Atlantique de Pêches et Océans Canada); les conditions atmosphériques aux périodes de trois heures analysées par le simulateur GEM (Service météorologique du Canada); les débits journaliers observés des 28 principaux tributaires du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent incluant la rivière Romaine (de sources diverses incluant Hydro-Québec). À l'étape 2, les solutions REG sont utilisées pour piloter les frontières ouvertes du simulateur HD. Les mêmes équations de conservation et champs de contraintes hydrologique et atmosphérique sont utilisés pour chaque domaine. 37
- Figure 4 : Schéma conceptuel du modèle d'écosystème illustrant la compétition entre les deux chaînes trophiques, respectivement herbivore (à gauche, traits continus) et microbienne (à droite, traits pointillés); la couleur des flèches montre la nature des interactions entre les variables: le vert pour la production primaire (photosynthèse et assimilation des nutriments), le rouge pour la prédation, le bleu pour la régénération de la matière organique et le noir pour l'exportation *via* la production de matière organique particulaire (pelotes fécales et cellules mortes). 38
- Figure 5 : Débits journaliers de la rivière Romaine observés à la station d'observation d'Hydro-Québec pour chaque année entre 1980 et 2001. L'année 2001, choisie comme année témoin, est montrée en trait gras. 39
- Figure 6 : Variabilité inter-annuelle de la biomasse phytoplanctonique en mg-Chl m⁻² simulée à l'échelle régionale. La concentration est intégrée verticalement et moyennée pour les mois de mars, avril et mai pour les années 1998 à 2001. Pour l'année 2001, seulement la région d'intérêt est montrée car les fichiers sont sauvegardés à haute fréquence pour piloter le simulateur HD. 40
- Figure 7 : Contraintes atmosphériques et hydrologiques moyennes sur le domaine HD durant la période de simulation. (a) Série temporelle journalière du débit naturel (bleu) et modifié (rouge) de la rivière Romaine pour l'année 2001 ; (b) température de l'air ; (c) intensité du vent ; (d) direction du vent ; (e) précipitations. 41

- Figure 8 : Champs physiques de surface (0-3m) moyennés à partir des solutions horaires sur la période du 1er mars au 31 août 2001. (a) courants en ms-1 ; (b) Salinité en surface montrant l'influence générale du panache de la rivière Romaine ; (c) Température en °C. 42
- Figure 9 : Série temporelle horaire de la solution HD sur le chenal de Mingan montrant les moyennes sur la couche de surface (0-3m) (bleu) et sur l'ensemble du domaine volumique HD (rouge). (a) Salinité ; (b) Température en °C ; (c) marqueur des eaux de la rivière Romaine ; (d) coefficient de diffusion turbulente verticale. 43
- Figure 10 : Moyenne quotidienne de la salinité de surface (0-3m) simulée par HD en 2001. (a) 15 mars ; (b) 15 avril, (c) 15 mai, (d) 15 juin, (e) 15 juillet, (f) 15 août. . 44
- Figure 11: Moyenne quotidienne de la température de surface (0-3m) (en °C) simulée par HD en 2001. (a) 15 mars ; (b) 15 avril, (c) 15 mai, (d) 15 juin, (e) 15 juillet, (f) 15 août. 45
- Figure 12: Comparaison entre les résultats de HD en 2001 (en rouge) et les observations de température et de salinité acquises à l'aide d'une sonde CTD à la station Caye-à-Cochon (bleu) en 2005. (a) et (b) montrent la température et la salinité près de la surface et (c) et (d) à 12m de profondeur. 46
- Figure 13: Comparaison entre les résultats de HD en 2001 (en rouge) et les observations de température et de salinité acquises à l'aide d'une sonde CTD à la station Petite Romaine (bleu) en 2005. (a) et (b) montrent la température et la salinité près de la surface et (c) et (d) à 12m de profondeur. 47
- Figure 14: Comparaison entre la température calculée par REG (en rouge) et la température observée à la station de Havre St-Pierre (50°06.5'N 63°38.5'W) à 1m de profondeur (bleu). Les données proviennent du programme de monitoring du ministère des Pêches et des Océans. Les données normalement acquises aussi à 100m de profondeur à cette station ne sont pas disponibles pour 2001. 48
- Figure 15: Comparaison entre les synthèses harmoniques du niveau d'eau aux stations 0721 et 0691. Les observations sont en bleu et les solutions HD en rouge. (a) Station 0721 (indices de grille i=8, k=74 sur la Fig. 1a) pour la durée de la simulation ; (b) Station 0721 montrant un cycle vives-eaux mortes-eaux ; (c) Station 0691 (indices i=8, k=84 sur la Fig. 1a). Les moyennes ont été soustraites pour chacune des séries. 49
- Figure 16: Comparaison entre les synthèses harmoniques des courants horizontaux pour la période du 10 juillet au 30 août 2001 aux stations Petite Romaine (colonne de gauche) et Caye-à-Cochon (colonne de droite). Les panneaux du haut montrent les courants horaires observés (bleu) et calculés (rouge) près de la surface les panneaux du bas à 12 m de profondeur. Les données de courants ont été acquises en 2005. .. 50
- Figure 17: Série temporelle horaire de la solution HD montrant les moyennes sur la couche de surface (0-3m) (bleu) et sur l'ensemble du volume d'eau de HD (rouge) pour le scénario modifié (voir Fig. 4 pour le scénario naturel). (a) Salinité ; (b) Température en °C ; (c) marqueur des eaux de la rivière Romaine ; (d) coefficient de diffusion turbulente verticale. 51
- Figure 18: Différences induites par la modification du débit de la rivière Romaine (on soustrait les résultats de la solution HD-NAT de la solution HD-MOD, pour voir seulement les différences après aménagement). Séries temporelles horaires de la solution HD montrant les moyennes sur la couche de surface (bleu) et de l'ensemble

du volume d'eau de HD (rouge). (a) Salinité ; (b) Température en °C ; (c) marqueur des eaux de la rivière Romaine ; (d) coefficient de diffusion turbulente verticale. ..	52
Figure 19: Résultats biologiques pour les simulations HD naturelles (courbes noires) et modifiées (courbes rouges). (a) Série temporelle journalière du débit de la rivière Romaine. Séries temporelles journalières moyennées dans l'horizontale sur le sous-domaine du chenal de Mingan pour la couche de surface (0-3m) : (b) Température °C ; (c) Salinité. Séries temporelles moyennées sur l'horizontale et intégrées sur la verticale entre la surface et 40 m de profondeur : (d) concentration des sels nutritifs ; (e) chlorophylle ; (f) biomasse de zooplancton ; (g) production primaire ; (h) production secondaire.	53
Figure 20: Comparaison entre les simulations HD-NAT (courbes noires) et HD-MOD (courbes rouges) des profils verticaux moyennés horizontalement dans le chenal de Mingan de la température, la salinité, les sels nutritifs totaux (NO ₃ +NH ₄) et la chlorophylle au 15 de chaque mois (moyenne journalière).	54
Figure 21: Profondeurs simulées de la couche euphotique avant (15 avril), pendant (15 mai) et après (15 juin) la crue de printemps pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite). La couche euphotique est définie selon la profondeur ou l'éclairement est réduit à 1% de l'éclairement incident à la surface. Elle détermine la zone dans laquelle il y a suffisamment de lumière pour la photosynthèse.	55
Figure 22: Salinité moyennée sur les dix premiers m de surface simulée au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	56
Figure 23: Température (en °C) moyennée sur les dix premiers m de surface simulée au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	57
Figure 24: Sels nutritifs (NO ₃ +NH ₄) intégrés sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	58
Figure 25: Chlorophylle intégrée sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	59
Figure 26: Production primaire intégrée sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	60
Figure 27: Production secondaire intégrée sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	61
Figure 28: Production primaire (haut) et secondaire (bas) intégrées sur toute la profondeur de la colonne d'eau et dans le temps (1 mars-31 août 2001) pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).	62
Figure 29: Résultats biologiques pour les simulations HD naturelles (trait noir), modifiées (trait rouge) et fortement modifiées (trait bleu). (a) Série temporelle journalière du débit de la rivière Romaine. Séries temporelles journalières moyennées dans l'horizontale sur le sous-domaine du chenal de Mingan pour la couche de surface: (b) Température en °C ; (c) Salinité. Séries temporelles moyennées sur l'horizontale	

et intégrées sur la verticale entre la surface et 40m de profondeur: (d) concentration des sels nutritifs ; (e) chlorophylle ; (f) biomasse de zooplancton; (g) production primaire; (h) production secondaire. Le trait rouge est continu, s'il semble interrompu, c'est que le trait bleu lui est superposé..... 63

1. Introduction

L'objectif de cette étude est de prédire, quantitativement et théoriquement, l'effet de la régulation du débit associé au développement du complexe hydroélectrique de la rivière Romaine sur la production planctonique dans le chenal de Mingan, une région du milieu marin confinée à l'intérieur de l'Archipel-de-Mingan (Fig. 1). La réserve de parc national du Canada de l'Archipel-de-Mingan (RPNCAM) est située entre Longue-Pointe-de-Mingan et Aguanish, dans les eaux du golfe du Saint-Laurent. Ce territoire insulaire de 112 km² comprend plus de 1000 îles et îlots côtiers qui s'étirent sur une distance de plus de 150 km entre l'île aux Perroquets, à l'ouest, et l'embouchure de la rivière Aguanish, à l'est. Le chenal de Mingan est un milieu côtier fermé par un chapelet d'îles occupant une superficie d'environ 170 km². D'ouest en est, le chapelet comprend les îles suivantes : du Havre de Mingan, à Bouleaux de Terre, à Bouleaux du Large, La Grande Île, Quarry, Niapiskau, à Firmin et du Fantôme. Il y a peu de connaissances acquises à ce jour sur la production planctonique à l'échelle du chenal ou de l'Archipel-de-Mingan. Cette production est fortement liée à la circulation et au climat, comprenant plusieurs échelles spatiales et temporelles caractérisées par une topographie complexe et une forte exposition au climat rigoureux des eaux du nord du golfe du Saint-Laurent. Les conditions océanographiques dans le détroit de Jacques-Cartier sont mieux connues. Les courants y sont dominés par la marée, une forte réponse aux tempêtes et une dérive moyenne vers l'ouest associée à la circulation cyclonique générale dans le golfe du Saint-Laurent (El-Sabh, 1976 ; Han et al., 1999 ; Koutitonsky and Bugden, 1991; Saucier et al., 2003).

La production planctonique est relativement forte dans la région du détroit de Jacques-Cartier (Le Fouest et al. 2005), incluant la région de l'Archipel-de-Mingan, en raison du renouvellement continu des eaux d'origine océanique riches en éléments nutritifs provenant du chenal d'Anticosti et du détroit de Belle-Isle. Ce renouvellement est dû à la circulation cyclonique et estuarienne générale dans le golfe du Saint-Laurent, au mélange hivernal sur toute la colonne d'eau (jusqu'à plus de 100 m de profondeur), aux mélanges associés à l'interaction des

courants de marée avec une topographie complexe et escarpée ainsi que des remontées fréquentes d'eau le long de la côte nord associées aux vents dominants (Bourque et Kelly, 1995). Ces épisodes d'enrichissement sont suivis, entre le printemps et l'automne, de périodes de stratification et d'ensoleillement permettant une production planctonique soutenue. Ces caractéristiques sont communes au golfe du Saint-Laurent, qui présente, en général, une forte floraison planctonique printanière et des régions de mélange et de production soutenues durant l'été et l'automne (cf. Le Fouest *et al.*, 2005, 2006).

La méthode utilisée repose sur le développement et l'application d'un simulateur numérique tridimensionnel à haute définition (ou résolution) de la circulation générale et de la production planctonique dans le chenal de Mingan. Il s'agit d'un logiciel informatique semblable à ceux utilisés pour la prévision météorologique ou la prédiction des changements climatiques. Ces simulateurs intègrent de grandes quantités de détails observés concernant les diverses composantes de la circulation et de la production planctonique tels que les conditions météorologiques (vent, température, radiation solaire, précipitation, évaporation), les conditions océaniques dans le golfe du Saint-Laurent et l'océan Atlantique (marées, courants, glace de mer, concentration en sels nutritifs, température et salinité) et le débit observé des rivières. Ils font interagir ces composantes en appliquant les principes premiers connus de la conservation du mouvement, de la chaleur, de l'eau douce, du volume, des sels nutritifs et de la biomasse sur des grilles discrètes et denses dans l'espace et le temps.

L'approche consiste, dans un premier temps, à étalonner et valider une simulation du cycle saisonnier naturel de la circulation générale et de la production planctonique. Par la suite, cette simulation, dite témoin, est reprise en modifiant seulement le débit de la rivière Romaine suivant le scénario de gestion proposé. Ainsi, la modification du débit est caractérisée par une augmentation de celui-ci durant l'hiver et une diminution durant la crue printanière et la période estivale. L'analyse des différences dans la réponse de la circulation et de la production primaire et secondaire entre les deux simulations permet ainsi d'isoler et de prédire l'effet de la modification proposée.

Les résultats montrent que le simulateur reproduit bien les conditions variables du climat et de la production planctonique observées dans le chenal de Mingan. La modification du débit de la rivière Romaine influence la production principalement de deux façons. Tout d'abord, l'augmentation du débit hivernal augmente légèrement la stratification des eaux, sans toutefois affecter la profondeur des mélanges qui homogénéisent la colonne d'eau sur plus de 100 m de profondeur, soit jusqu'au fond dans cette région. La concentration en sels nutritifs disponibles dans la colonne d'eau au début du printemps n'est pas affectée. L'augmentation de la stratification hivernale entraîne d'abord une légère diminution de la production primaire en mars, de l'ordre de 5%, et un rattrapage complet avant la crue qui survient vers la mi-mai. Ce résultat est équivalent à un retard de quelques jours dans la production primaire au printemps. Ce changement a un effet négligeable sur la production secondaire. L'effet de la modification du débit sur la stratification dans le chenal de Mingan et sur la production planctonique pendant et après la crue est plus faible. Il apparaît que le système planctonique du chenal de Mingan est sensible à l'absence ou à la présence d'une stratification. Celle-ci est déterminée par le cycle saisonnier à l'échelle régionale, la fonte des glaces de mer et le réchauffement vernal. Les modifications proposées pour la rivière Romaine ne sont pas suffisantes pour altérer ce régime, la circulation générale ou les mélanges. Le deuxième effet provient du changement dans la turbidité associée à l'eau douce de la rivière qui limite la lumière nécessaire à la photosynthèse dans la colonne d'eau. Cet effet est significatif seulement durant la crue printanière, période durant laquelle le panache est moins étendu après l'aménagement, et demeure limité dans le temps et dans l'espace. En résumé, les différences montrent que la gestion du débit de la rivière Romaine entraîne une augmentation nette de l'ordre de 5% de la production planctonique dans le chenal de Mingan et que cette augmentation est peu significative en comparaison avec la variabilité naturelle du système (Le Fouest *et al.*, 2005; Chifflet *et al.*, 2004).

Dans les sections suivantes, nous revoyons d'abord la méthode utilisée et la stratégie de simulation. Nous examinons ensuite les résultats pour la circulation

générale à haute définition ainsi que les points de validation disponibles pour les variables physiques. Nous démontrons que le nouveau simulateur hydrodynamique est relativement précis et robuste, cohérent avec les grandes échelles et avec les observations *in situ* disponibles. Nous examinons les différences entre les résultats obtenus avec un cycle naturel d'écoulement de la rivière Romaine et ceux obtenus avec deux scénarios de gestion, le premier décrivant une situation normale de gestion et le second, improbable et motivé par le besoin d'un examen plus approfondi des différences obtenues avec le premier, exacerbant l'effet d'un débit plus élevé en hiver.

2. Méthode

2.1 Simulation numérique de la variabilité du milieu marin

La circulation générale et la production planctonique dans le chenal et l'Archipel-de-Mingan sont le résultat de nombreux événements naturels tels que les marées, les conditions météorologiques variées (incluant des événements de précipitation extrême, des tempêtes, etc.), un fort cycle saisonnier et les fluctuations dans le débit des rivières. Ces contraintes se combinent et leurs effets se cumulent pour contrôler des processus de mélange et d'échange très variables sur des périodes aussi courtes que quelques heures. Ces processus sont à la base de la production planctonique. Dans le but d'examiner l'effet d'une modification du débit de la rivière Romaine dans le milieu marin, les divers processus qui affecteront la dispersion du panache de la rivière et, indirectement les effets sur la circulation générale et la production planctonique, doivent être pris en compte le plus précisément possible. Dans les sections suivantes, nous démontrons une telle approche par simulation numérique.

La méthode utilisée représente un standard dans la prévision environnementale des fluides géophysiques. Cette approche est basée sur la formulation mathématique, programmée sur des ordinateurs de grande capacité, des lois de conservation sur un domaine géographique limité décrit sous la forme d'une grille discrète tridimensionnelle. Pour chacune des cellules ou nœuds de la grille et ce, sur des pas de temps discrets de l'ordre d'une minute, sont calculées

les variables d'états indépendantes et couplées du système climat-plancton (e.g., courants, température, salinité, rayonnement solaire, quantités turbulentes, sels nutritifs, biomasses). D'une part, les changements de ces quantités sont fonction des échanges aux frontières du domaine. À la surface, on tient compte des radiations (ensoleillement), des vents, de la température, des précipitations et de l'évaporation. Sur les côtés ouverts du domaine, on tient compte des échanges avec les eaux du golfe du Saint-Laurent (marées, courants, concentrations en sels, chaleur et énergie turbulente). Finalement, sur la frontière avec le continent, on tient compte des apports des tributaires, particulièrement du débit d'eau douce (flux de volume) de la rivière Romaine. D'autre part, à l'intérieur du domaine, les changements sont calculés à chaque pas de temps et pour chaque nœud en fonction des courants instantanés, des mélanges turbulents, de la lumière disponible dans la colonne d'eau et des processus d'échanges biogéochimiques.

Le simulateur numérique est utilisé de manière entièrement pronostique, c'est-à-dire qu'étant donné les détails des contraintes connus à grande échelle aux frontières du domaine, il calcule l'évolution des variables d'état dans le temps sur des périodes de plusieurs saisons ou années sans corriger (ou rectifier) la solution au cours de la simulation (par exemple, à l'aide d'observations ou d'une climatologie). Cette caractéristique permet de simuler la variabilité naturelle, dite virtuelle, que nous pouvons ensuite valider *a posteriori* à l'aide d'observations acquises de manière indépendante. Lorsqu'un simulateur reproduit fidèlement la réalité, nous pouvons reprendre le calcul en introduisant une modification précise dans les contraintes et examiner comment la solution diffère. Cette approche permet d'isoler et de quantifier théoriquement les effets directs et indirects d'une modification dans le débit d'une rivière ou d'autres variations climatiques particulières.

2.2 Circulation générale

Le modèle de circulation générale utilisé pour cette étude est dérivé du modèle de glace de mer et de circulation des eaux du golfe du Saint-Laurent

développé par Saucier *et al.* (2003, 2004). Il représente la composante océanique du modèle opérationnel de prévision météorologique GEM (Pellerin *et al.*, 2004) et du modèle climatique régional canadien CRCM (Faucher *et al.*, 2003). Il est utilisé pour la production de prévisions maritimes opérationnelles au Service Hydrographique du Canada (Pêches et Océans Canada). D'autres versions du simulateur sont aussi utilisées pour piloter des modèles biologiques de production planctonique (Le Fouest *et al.*, 2005, 2006), de migrations des populations de krills (Sourisseau *et al.*, 2004; 2006), de dynamique des populations de copépodes planctoniques (Maps *et al.*, 2007) ou encore d'algues toxiques (Fauchot *et al.*, 2007) dans le golfe, l'estuaire du Saint-Laurent et la baie d'Hudson. La capacité du simulateur physique et de la version couplée circulation-écosystème à produire des champs physiques et biogéochimiques réalistes a été validée avec succès à l'aide de données de terrain (température, salinité, niveaux d'eau, glace de mer, chlorophylle-a et nitrates) et satellites (température de surface et couleur de l'eau) sur la période 1997-2003 en ce qui concerne la physique (Saucier *et al.*, 2003; Le Fouest *et al.*, 2006) et pour la période 1997-1999 en ce qui a trait à la biologie (Le Fouest *et al.*, 2005, 2006; Chifflet *et al.*, 2004; Maps *et al.*, 2007).

2.3 Pilotage à haute définition

La production planctonique dans l'Archipel-de-Mingan est dominée par la circulation générale dans le golfe du Saint-Laurent ainsi que par les complications locales associées aux fines échelles qui décrivent la topographie de l'archipel et le devenir du panache d'eau douce de la rivière Romaine. Le simulateur déjà disponible pour l'ensemble du golfe du Saint-Laurent (Le Fouest *et al.*, 2005), qu'on dénommera REG (pour régional), permet de quantifier les effets éventuels de la modification du débit de la rivière Romaine à l'échelle du golfe du Saint-Laurent. Cependant, celui-ci possède une résolution horizontale limitée de 5 km qui ne permet pas de résoudre les échelles locales. Dans un tel cas, une stratégie usuelle est d'imbriquer à l'intérieur du modèle régional (REG) une implantation du même simulateur (même formulation mathématique) sur une grille à plus haute définition spatiale. Ce travail donne lieu au simulateur à haute

définition du chenal de Mingan, dénommé par la suite HD. Il permet effectivement de focaliser et de préciser les solutions régionales à une échelle horizontale plus fine de 400 m. Le modèle HD est alors dit piloté, ou couplé de manière unidirectionnelle, au simulateur REG. Les grilles superposées des simulateurs REG et HD ainsi que la résolution de la topographie de chacun d'eux sont schématisées à la Fig. 2. Le domaine spatial de HD déborde le chenal de Mingan dans le but de diminuer la sensibilité de la circulation générale calculée dans le chenal aux effets des interpolations des solutions REG aux frontières du domaine HD.

Le simulateur REG fournit aux frontières latérales ouvertes du simulateur HD l'ensemble des variables physiques (température, salinité, glaces de mer et niveau d'eau) et biologiques (sels nutritifs, phytoplancton, zooplancton et détritiques). Les simulations HD utilisent les mêmes contraintes atmosphériques (vents, humidité relative, pression, précipitations, rayonnement solaire) que les simulations régionales ainsi que les mêmes scénarios pour le débit de la rivière Romaine. Un schéma illustrant les contraintes aux frontières ainsi que la stratégie de pilotage est présenté à la Fig. 3. Le simulateur REG fournit aussi les conditions initiales à un temps choisi pour démarrer les simulations sur le domaine HD : la température, la salinité, la couverture de glace de mer, les concentrations en sels nutritifs et les biomasses phytoplanctonique et zooplanctonique. Ces variables sont interpolées dans l'espace sur le domaine HD. Limités par la capacité de calcul et la disponibilité des champs de contraintes historiques (voir Section 2.5 et 2.6), le simulateur REG peut simuler plusieurs années consécutives, tandis que le simulateur HD peut simuler les conditions à haute définition sur plusieurs mois, à raison d'approximativement une semaine de calcul pour deux mois de simulation.

2.4 Modèle de l'écosystème

Pour la partie biologique de cette étude, nous avons utilisé le modèle couplé d'écosystème planctonique de Le Fouest *et al.* (2005). Celui-ci tire avantage de la résolution du modèle océan-glace pour simuler les variables les plus importantes et d'intérêt en écologie planctonique. Le schéma conceptuel de ce

modèle d'écosystème planctonique est présenté à la Fig. 4. Le modèle biologique est de type NPZ pour Nitrate, Phytoplancton et Zooplancton. Le modèle met en compétition les deux chaînes trophiques classiques, herbivore et microbienne, telles que généralement décrites pour les eaux côtières tempérées et sub-arctiques. Le système d'équations de l'écosystème permet de simuler l'évolution des variables suivantes : deux types de nutriments, soient les nitrates (NO_3), source de production nouvelle, et l'ammonium (NH_4), source de production régénérée; deux types de phytoplancton, classiquement les diatomées ($> 5 \mu\text{m}$) et petits flagellés autotrophes ($< 5 \mu\text{m}$), croissant tous deux sur les nitrates et l'ammonium; deux types de zooplancton, soient le micro- ($< 200 \mu\text{m}$) et le mésozooplancton ($> 200 \mu\text{m}$); finalement deux types de matière organique, soit dissoute ou en suspension (MOD) et particulaire (MOP qui, par opposition, sédimente). La chaîne trophique dite herbivore regroupe les diatomées, le mésozooplancton et la matière organique particulaire. Elle est principalement alimentée par les nitrates. Un couplage étroit entre le taux de croissance du microphytoplancton, le taux de broutage du microzooplancton et la régénération de la matière organique dissoute en ammonium rend compte de la dynamique particulière du réseau trophique microbien qui fonctionne principalement sur la base de la régénération de la matière organique.

Bien que la production primaire à la base du réseau trophique soit essentiellement contrôlée par le climat et la circulation, les maillons supérieurs intègrent une variabilité et une complexité croissantes. En effet, le zooplancton, en particulier, est déjà à la limite prédictive de ce type de simulation. Il se retrouve en de nombreuses espèces ayant des comportements propres de natation, d'hibernation ou de prédation par exemple, autant de facteurs inopérants dans la dynamique du zooplancton simulée. L'objectif de cette étude est d'évaluer, au premier ordre, la croissance du zooplancton en fonction de la disponibilité en nourriture (phytoplancton) et la régénération en sels nutritifs associés à la matière organique dissoute et particulaire. La complexité du comportement du zooplancton au niveau des populations n'est pas abordée ici.

Les nitrates sont généralement entraînés dans l'Archipel-de-Mingan via la circulation océanique régionale. Les apports en sels nutritifs provenant de la rivière Romaine sont, en comparaison, négligeables. En effet, la concentration en sels nutritifs dans les eaux de la rivière est maximale durant l'hiver et comparable à la concentration d'environ 2 mmol m^{-3} que l'on retrouve dans le milieu marin (Hydro-Québec et Genivar, 2005). Elle tombe ensuite rapidement vers des valeurs très faibles et indétectables (Hydro-Québec et Genivar, 2005). Ici, on néglige les apports en sels nutritifs de la rivière. Il n'y a donc pas d'approximation pendant et après la crue puisque les valeurs observées sont faibles durant ces périodes. Avec un scénario d'augmentation du débit en hiver et précédant la crue, en raison de notre approximation, le simulateur pourrait sous-estimer une légère augmentation de la production. Cependant, tel que décrit plus loin, le mélange complet de la colonne d'eau durant l'hiver maintient des concentrations homogènes en sels nutritifs sur toute la colonne d'eau qui sont indépendantes du débit de la rivière Romaine. Ces concentrations sont effectivement semblables aux observations dans la rivière durant cette période.

Une relation entre la salinité et le coefficient d'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau est définie à partir de mesures de salinité, chlorophylle *a* (Chl_a) et de lumière récoltées pendant les missions océanographiques de validation SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view) à l'automne 1997 et 1998, été 1999, et printemps 2001) pour un total de 63 stations couvrant l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent (voir Le Fouest et al., 2006). Cette relation tend à représenter l'effet de la matière organique dissoute et des particules en suspension (sédimentaires ou organiques) transportées par l'eau douce des rivières sur l'atténuation de la lumière, définissant ainsi la radiation disponible pour la photosynthèse et l'épaisseur de la couche euphotique. Cette relation est valide dans des milieux estuariens de Type 2 (voir Nieke et al., 1997) sur la plage de salinité d'environ 24 à 32 que nous retrouvons dans le chenal de Mingan (voir les résultats ci-dessous). La relation linéaire utilisée sous-estime le coefficient d'atténuation pour de plus faibles salinités (voir Le Fouest *et al.*, 2005) que nous retrouvons seulement à l'intérieur du panache de la rivière, près de

l'embouchure et durant la crue. Par ailleurs, la sous-estimation du coefficient d'atténuation de la lumière pour les faibles salinités compense partiellement pour le contenu manquant en sels nutritifs de la rivière.

2.5 Choix de la période de simulation

La productivité planctonique dans le nord du golfe du Saint-Laurent est caractérisée par un cycle saisonnier important, marqué durant l'hiver par une faible stratification, de forts mélanges et une faible production. Durant cette période, la biomasse phytoplanctonique est en quelque sorte remise à zéro et les sels nutritifs sont remis à niveau avec les conditions à grande échelle dans la couche de surface hivernale du nord du golfe (approximativement de 80 à 120 m d'épaisseur). Le système est ensuite caractérisé par une forte floraison printanière, suivie en été par une forte stratification moyenne accompagnée d'épisodes variables de mélange vertical et de production primaire. Le cycle saisonnier, comprenant tous ses constituants décrits plus haut, forme la base temporelle de l'étude de la production planctonique.

L'année 2001 a été choisie comme une année typique définissant le scénario de base. Le choix de cette année reposait sur les critères suivants : (1) la disponibilité des forçages atmosphériques et aux frontières océaniques du golfe du Saint-Laurent (disponibles avec suffisamment de précision depuis 1996, voir Saucier et al., 2003); (2) la disponibilité d'observations des débits pour la rivière Puyjalon et la rivière Romaine ; (3) une année durant laquelle il n'y aurait pas de déversement en conditions futures; (4) une année normale du point de vue hydrique; (5) une année typique pour la production primaire et le climat du golfe du Saint-Laurent.

Le débit de la rivière Romaine est mesuré à la station 073801 du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), située au PK 16 de la rivière. Entre cette station et l'embouchure se rajoute le débit provenant de la rivière Puyjalon et de certains petits tributaires, dont la superficie du bassin versant totalise 1 330 km². Certaines années, il arrive que la crue de la rivière Puyjalon devance celle de la Romaine et on a souhaité que les débits de l'embouchure prennent en considération le plus adéquatement possible ce décalage entre les pointes de

crue. Cependant, le débit de la Puyjalon n'est mesuré par Hydro-Québec que depuis l'année 2001. Seules les années de 2001 à 2003 pouvaient donc être utilisées pour simuler les conditions actuelles et futures en tenant compte de l'hydrogramme réel de la rivière Puyjalon.

Selon le modèle de simulation de production hydroélectrique du complexe de la Romaine¹, il n'y a pas de déversements prévus en 2001, ce qui a pour effet d'accentuer les différences entre le régime hydrologique en conditions actuelles (ou débits naturels) et futures (débits modifiés). C'est¹ également le cas de l'année 2002.

La Fig. 5 compare les débits de l'année 2001 aux débits des 20 années précédentes, au site de la station du CEHQ, bien que les simulations des débits du complexe de la Romaine couvrent la période de 1957 à 2003. La compilation graphique de tous les hydrogrammes disponibles aurait rendu la lecture de la figure difficile. Durant l'année 2001, le débit moyen a été de $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à la station du CEHQ alors que depuis 1957, le débit moyen annuel a été $294 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La pointe de crue printanière est survenue le 16 mai et a été de $1\,422 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ce qui est légèrement plus bas que la crue médiane de $1\,523 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La crue de la mi-juillet n'est pas exceptionnelle, et survient fréquemment en juillet. L'année 2001 représente donc une année hydrologique normale.

La variabilité inter-annuelle de la production primaire dans le golfe du Saint-Laurent est importante et dépend des forçages météorologiques à grande échelle, en particulier la rigueur de l'hiver précédant la saison de production (Plourde et Therriault, 2002). La Fig. 6 montre la production primaire simulée à l'aide du simulateur REG pour les périodes de forte production (moyennée sur la colonne d'eau pour la période des mois de mars à mai), pour chacune des années 1998 à 2001 dans la région du détroit de Jacques-Cartier. Bien que les patrons généraux de production ne varient pas d'une année à l'autre, étant déterminés par la topographie et les composantes physiques du cycle saisonnier décrites plus haut, les variations inter-annuelles sont importantes. L'année 1998,

¹ La simulation de la production d'énergie est expliquée à la méthode M3 du Vol. 9 de l'étude d'impact sur l'environnement du complexe de la romaine (Hydro-Québec, en prép.).

par exemple, montre une productivité plus faible que l'année 2000. L'année 2001, pour sa part, se situe entre les deux. Avec la puissance de calcul disponible et les autres facteurs limitants décrits plus haut, il n'est pas possible de simuler chaque année à haute résolution. D'autre part, il n'est pas à la portée de cette étude d'examiner les causes de la variabilité inter-annuelle régionale de la production.

2.6 Production de scénarios

Le débit de la rivière Romaine est prescrit selon deux scénarios. Le premier, dénommé NAT, correspond aux observations disponibles en 2001 et le second, dénommé MOD, tient compte de la proposition de gestion du débit en conditions futures. Des simulations pour l'ensemble du golfe (REG), représentant d'une part les conditions naturelles (NAT) et d'autre part les conditions modifiées (MOD), sont d'abord réalisées pour l'année 2001. Les résultats sont extraits et sauvegardés aux pas de temps de 60 min le long des frontières et à l'intérieur du domaine HD. Le simulateur HD est ensuite initialisé en 3D pour la température, la salinité, les concentrations en sels nutritifs, la concentration et l'épaisseur de la glace de mer et les biomasses phytoplanctonique et zooplanctonique au 1^{er} mars 2001. Les glaces de mer encore présentes au début de la simulation sont rapidement évacuées de la région durant les premiers jours du mois de mars. Le simulateur HD est ensuite piloté par les solutions REG pour des simulations en mode NAT et MOD sur une période de six mois comprise entre le 1^{er} mars et le 31 août 2001, soit la période de production planctonique significative. La Fig. 7 présente les deux scénarios de forçage hydrologique ainsi que le forçage atmosphérique moyen sur le domaine HD durant cette période. Les simulations à haute définition ne couvrent que la période de production planctonique significative afin de minimiser les contraintes de temps de calcul. Il est théoriquement possible de simuler un cycle annuel complet ou même plusieurs années différentes, comme c'est le cas dans la configuration REG, mais dans la pratique une seule simulation HD produisant une solution de six mois sur un ordinateur de type SUN V880 requiert trois semaines de calcul continu. Les

périodes de simulation et la résolution spatiale des configurations REG et HD sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Principales caractéristiques des simulations.

Simulation	Date de début	Date de fin	Résolution horizontale	Résolution verticale	Débit de la Romaine
REG_NAT	04-12-2000	31-12-2001	5 km	5 m (10 m au delà de 300 m)	Naturel
REG_MOD	04-12-2000	31-12-2001	5 km	5 m (10 m au delà de 300 m)	Modifié
HD_NAT	01-03-2001	31-08-2001	400m	3 m (5 m au delà de 45 m)	Naturel
HD_MOD	01-03-2001	31-08-2001	400 m	3 m (5 m au delà de 45 m)	Modifié

3. Circulation générale

3.1 Conditions océanographiques moyennes dans le chenal de Mingan

Il n'est pas possible d'illustrer toute la variabilité spatio-temporelle des simulations numériques en raison de la grande quantité d'informations produites (plus d'un Téraoctet). En général, on examinera des séries temporelles de moyennes spatiales ou bien des moyennes temporelles de variations spatiales. Les moyennes et intégrations spatiales sont définies sur le sous-domaine du chenal de Mingan (Figs. 1b et 2a). Dans un premier temps, nous présentons les résultats généraux de la simulation HD-NAT. La Fig. 8 montre les courants, la salinité et la température dans la couche de surface (0-3 m), moyennés sur les six mois de la simulation (1^{er} mars au 31 août 2001). Les températures et les salinités de surface sont dans la plage des valeurs généralement observées à l'intérieur de l'archipel, de 24 à 30 pour la salinité et environ 4°C pour la température. La zone d'influence de la rivière Romaine est marquée dans la zone de l'embouchure (entre la côte et l'île de la Grosse Romaine) et le panache de dilution s'étend au sud vers l'île Quarry, principalement vers l'ouest entre la côte et la Grande Île. L'extension vers l'est du panache de dilution est limitée et

ne dépasse pas généralement la Petite Romaine. En moyenne, durant la période de simulation, la région du chenal et des eaux environnantes est caractérisée par des eaux plus froides que les eaux du détroit de Jacques-Cartier (Fig. 8c). Ceci est dû à l'activité turbulente tidale plus intense dans le chenal de Mingan, mélangeant les eaux de surface avec les eaux de la couche intermédiaire froide du golfe du Saint-Laurent. Les courants de surface moyens intègrent toutes les sources de variabilité tels que les marées ou les vents (Fig. 8a). Ces courants résiduels sont de l'ordre de 5 à 50 cms^{-1} et montrent de nombreuses structures tourbillonnaires dues aux interactions topographiques. Il est cependant possible d'identifier une circulation générale de d'est en ouest pour la zone de l'archipel, en particulier dans le chenal de Mingan, ce qui rend compte de la dilution préférentielle du panache de la rivière Romaine au nord-ouest de la Grande Île.

3.2 Variabilité saisonnière et de basse fréquence des conditions océanographiques

La Fig. 9 montre l'évolution saisonnière de la température, de la salinité, de la concentration du traceur des eaux de la rivière et de l'activité turbulente moyennées sur le sous-domaine du chenal de Mingan. Le traceur des eaux de la rivière Romaine permet de calculer la concentration de ces eaux dans le chenal de Mingan. Cette variable scalaire est passive dans la circulation et le mélange, initialisée à zéro dans tout le domaine et prescrite avec une valeur unitaire à l'embouchure de la rivière. L'évolution saisonnière produite dans cette simulation de référence est marquée par une transition entre une période post-hivernale mélangée (mars-avril) et une période estivale stratifiée (juin-août) due au réchauffement vernal (5 à 7°C) des eaux de mars à juin, mais aussi à l'augmentation des débits de la rivière Romaine à la mi-mai, ainsi qu'à la crue des autres rivières le long de la côte et à la fonte des glaces de mer dans la région (Fig. 9ab). La stratification s'illustre par les différences de température et de salinité entre la surface (0-3m) et la moyenne de la colonne d'eau, augmentant rapidement au moment de la crue printanière. Cette augmentation de la stratification à la mi-mai entraîne une forte diminution de l'activité turbulente (Fig. 9d) qui présente durant l'été une faible variabilité liée au cycle vives

eaux/mortes eaux. Superposée à cette évolution saisonnière, la période estivale est marquée par une variabilité aux périodes de quelques jours à quelques semaines qui affecte tant la salinité que la température, en surface comme en profondeur. Cette variabilité est générée principalement par des épisodes de renouvellement des eaux de l'archipel associés à la circulation régionale dans le détroit de Jacques-Cartier et, dans une moindre mesure, à l'augmentation du débit de la Romaine de la mi-juillet. La diminution rapide de la quantité de traceur des eaux de la rivière dans le chenal après chaque augmentation du débit de la Romaine (Fig. 9c) montre le renouvellement rapide (de l'ordre d'une semaine ou moins) des eaux de l'archipel.

Les Fig. 10 et 11 montrent l'importance de la variabilité spatiale des champs de surface (température et salinité) en réponse à la variabilité de basse fréquence au long de la simulation. La distribution spatiale de la température et la salinité de surface montre peu de structures en mars et avril à cause de la forte activité turbulente et la faible stratification durant cette période. Le réchauffement des eaux de surface à la mi-mai (+2 à 5 °C) pendant la période de crue printanière est relativement homogène sur l'ensemble de la région mais les structures sont beaucoup plus marquées en salinité. Celles-ci montrent une franche division entre la zone de l'étalement du panache de la rivière vers l'ouest de l'embouchure et l'intrusion d'eaux de surface du détroit de Jacques-Cartier par le Grand Chenal et le Chenal aux Bouleaux. Ces eaux du large dessalées ont pour origine la dilution des eaux de crue dans le modèle REG au cours des jours précédents, la crue des autres rivières et la fonte des glaces de mer. Ces résultats suggèrent qu'une partie des eaux du panache entraînées au large peut revenir dans le chenal de Mingan du fait de la circulation régionale dans le détroit de Jacques-Cartier au voisinage de l'archipel.

Les champs à la mi-juin et à la mi-août (Figs. 10 et 11), en période de faibles débits, présentent des structures différentes avec un panache d'extension limitée, des eaux plus froides dans tout l'archipel et un gradient de température côte/large plus conforme à la moyenne sur la période (cf. Fig. 8). Ces conditions résultent en grande partie des mélanges turbulents plus intenses générés par les

marées dans l'archipel. Les champs de surface à la mi-juillet montrent l'étendue de l'événement de crue secondaire, avec un panache marqué de la rivière Romaine qui est toujours évacué préférentiellement vers l'ouest et une intrusion similaire plus faible mais conséquente des eaux de surface du large au sud et à l'est du domaine. Les températures des eaux de surface sont alors les plus élevées pour la période simulée (Fig. 9b) résultant du maximum de réchauffement estival mais aussi de l'intrusion, dans l'archipel, des eaux de surface relativement plus chaudes du détroit de Jacques-Cartier. Ces résultats illustrent l'importance des mélanges tidaux et des échanges entre le détroit de Jacques-Cartier et l'Archipel-de-Mingan dans la dynamique des conditions physiques de la zone d'étude.

Deux courantomètres électromagnétiques S4, déployés au cours de l'été 2005 aux stations Petite Romaine et Caye-à-Cochon dans le chenal de Mingan (cf. fig. 1b) étaient équipés de sondes de température et de salinité à 2 et 12 m de profondeur. Bien que ces données n'aient pas été acquises durant la période de simulation, elles sont utilisées pour vérifier le réalisme de la variabilité des conditions simulées. Les Figs. 12 et 13 présentent une comparaison de la température et la salinité simulées aux points de grille les plus près de la position de ces mouillages et aux profondeurs correspondantes aux capteurs. Ces graphiques montrent que les températures et salinités simulées en juillet et août sont généralement en accord avec les observations et que la variabilité synoptique et tidale des observations est du même ordre de grandeur que celle générée par le modèle. On note que la crue secondaire observée en juillet 2001, responsable de la baisse de salinité aux stations, n'est pas présente en 2005. En complément, il est important de préciser que les solutions du modèle REG montrent la même variabilité à basse fréquence en été dans le détroit de Jacques-Cartier. Cette variabilité a été validée pour la température à l'aide de comparaisons avec des observations issues du programme de monitoring permanent de Pêches et océans Canada (e.g., Saucier *et al.*, 2003; Le Fouest *et al.*, 2006). Le résultat de cette comparaison, pour la période de mesure de la mi-mai à la mi-novembre 2001, est présenté à la Fig. 14 pour la station #5 située

dans le détroit de Jacques-Cartier à la hauteur de l'Archipel-de-Mingan au sud-est du domaine HD. La variabilité simulée des températures en surface dans le détroit est proche de celle des observations, en particulier dans les plus basses fréquences associées aux épisodes d'advection horizontale et de renouvellement important des masses d'eau. L'erreur moyenne est de $0,1^{\circ}\text{C}$ et la déviation standard de $1,8^{\circ}\text{C}$. Les forçages océaniques utilisés pour piloter le simulateur HD intègrent donc de manière réaliste la variabilité des conditions océanographiques du détroit de Jacques-Cartier.

3.3 Variabilité tidale des conditions océanographiques

La simulation pour l'année 2001 montre une propagation régulière et réaliste de la marée d'est en ouest et des courants de marée de l'ordre de 1 à $1,5 \text{ ms}^{-1}$, présentant des accélérations dans les zones de faible profondeur ou de constriction entre les îles de l'archipel. La variabilité tidale des niveaux d'eau est validée par comparaison avec les observations de deux marégraphes déployés au cours de l'été 2001 (Fig. 15). Aucune donnée de courant n'est disponible pour l'année 2001. Toutefois, les données des courantomètres des mouillages déployés à l'été 2005 aux stations Petite Romaine et Caye-à-Cochon permettent de vérifier que la variabilité tidale des courants de marée est réaliste. Cette comparaison est présentée à la Fig. 16 où les courants horaires instantanés issus du modèle et des observations pour la période de recoupement des deux séries (juillet et août) sont représentés dans un espace orthogonal des vitesses Nord et Est. Cette figure montre que les amplitudes des courants sont les mêmes ($0,75 \text{ ms}^{-1}$) et les directions globalement comparables avec une composante zonale dominante (parallèle à la côte). Le plus fort biais dans la direction des courants à la station Caye-à-Cochon n'excède pas 20° .

Ces courants de marées et l'activité turbulente associée produisent un cycle de formation et de destruction du panache de la rivière Romaine qui se développe et s'étend au jusant jusqu'à la pointe nord-est de l'île Quarry. Au flot, le panache est repoussé et dispersé au nord-ouest de la Grande Île. Ce comportement du panache est en accord avec les photos aériennes montrées à

la carte 22-9 de l'étude d'impact sur l'environnement du complexe de la Romaine (en prép.).

4. Production planctonique et effet de l'aménagement de la rivière Romaine

Nous présentons les résultats de la composante biogéochimique du simulateur HD pour les scénarios naturel (NAT) et modifié (MOD), associés aux différences induites dans le climat hydrodynamique. La Fig. 17 montre, pour le scénario MOD à l'instar de la Fig. 9 pour les conditions NAT, les séries temporelles horaires de la température, la salinité, le contenu en traceur des eaux de la rivière et le coefficient de diffusion verticale turbulente. En comparant les Figs. 9 et 17, on note les résultats attendus suite à l'aménagement de la rivière : la stratification (mesurée par la différence entre les traits bleu et rouge aux panneaux 9a et 17a) augmente au cours de l'hiver et diminue durant la crue printanière. Ces changements sont liés à une différence dans la salinité de surface, celle-ci étant généralement inversement proportionnelle au débit et à la concentration des eaux de la rivière (voir panneaux 9c et 17c). La salinité moyenne en profondeur est relativement peu affectée. On note que la température est peu modifiée en général. Finalement, une comparaison des Figs. 9d et 17d montre que l'activité turbulente demeure élevée en hiver et faible en période de stratification. Les différences entre les deux solutions sont montrées à la Fig. 18, où sont soustraits les résultats de la solution HD-NAT (Fig. 9) à ceux de la solution HD-MOD (Fig. 17). La Fig. 18 isole donc les écarts dans les conditions de stratification et de mélange associés au scénario d'aménagement. La Fig. 18a confirme une différence de salinité de l'ordre de 0,2 psu en surface et de moins de 0,05 psu en moyenne dans le chenal de Mingan durant l'hiver. Au cours de la crue printanière, la différence atteint près de 3 psu en surface durant quelques jours au maximum de la crue et demeure faible, moins de 0,2 psu, en moyenne. La Fig. 18b montre que la température est un peu plus élevée, de l'ordre de 0,1 en moyenne à 1°C durant la crue. Ces écarts de température ne sont pas significatifs, sinon marginalement positifs, pour la

production biologique et ne seront pas considérés davantage. Finalement, la Fig. 18d confirme une diminution de l'activité turbulente avant la crue printanière, avec un effet négligeable par la suite. En résumé, les résultats physiques confirment une augmentation de la stratification hivernale ayant pour effet significatif, bien que non-inhibiteur, une diminution de l'activité turbulente et de la diffusion des sels nutritifs dans la verticale.

La Fig. 19 montre l'évolution temporelle des solutions NAT et MOD, moyennées sur le sous-domaine du chenal de Mingan et superposés sur les mêmes graphiques : le débit de la rivière Romaine, la température, la salinité et les quantités biogéochimiques. Les panneaux (d) à (h) de la Fig. 19 montrent, respectivement, les sels nutritifs totaux ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$), la chlorophylle totale (diatomées et flagellés) et les productions primaire (diatomées et flagellés) et secondaire (microzooplancton et mésozooplancton) totales; ces variables sont intégrées entre 0 et 40 m de profondeur, zone d'influence maximale des eaux de la rivière. Les deux simulations NAT et MOD montrent un cycle de production typique dans le nord du golfe du Saint-Laurent (Le Fouest et al., 2005). Les deux situations sont semblables et la modification du débit induit des changements mineurs comparativement à la variabilité saisonnière ou synoptique. On examine donc, en premier lieu, le comportement général du système.

4.1 Production planctonique

Les solutions NAT et MOD pour les composantes biogéochimiques sont qualitativement très semblables. Nous examinons d'abord le cycle commun aux deux conditions. La floraison phytoplanctonique (« bloom ») au printemps (période de mars et avril) est principalement amorcée par la fonte de la glace (dès le début de la simulation) et par la grande disponibilité en sels nutritifs suivant le mélange hivernal des eaux de surface (environ les 100 premiers m) dans le golfe. On note que le stock de sels nutritifs (Fig. 19d), initié à partir des solutions MOD et NAT du simulateur REG, est le même au début mars dans chacun des scénarios, confirmant l'effet négligeable de la modification du débit dans le renouvellement hivernal des eaux du chenal de Mingan. Cette floraison majeure est classiquement dominée par les diatomées (phytoplancton $> 5 \mu\text{m}$) et

se traduit par une augmentation rapide de la biomasse phytoplanctonique (près de 200 mgChla m⁻² à la fin mars). Cette augmentation est associée à un premier maximum de production primaire (près de 2 gC m⁻²j⁻¹) et à la consommation de la presque totalité des sels nutritifs disponibles au début du mois d'avril. Les biomasses et les productions simulées sont cohérentes avec les valeurs observées dans le golfe du Saint-Laurent (Steven, 1974; de Lafontaine et al., 1991; Savenkoff et al, 2000).

Par la suite, les simulations montrent des alternances de périodes de plus faibles (0,5 gC m⁻²j⁻¹) et de plus fortes (1,0-1,5 gC m⁻²j⁻¹) production primaire (Fig. 19g). Ces périodes correspondent respectivement aux périodes de crue et d'étiage. En période d'étiage, le renouvellement régulier et relativement rapide des eaux de l'archipel par les eaux du détroit de Jacques-Cartier alimente le chenal de Mingan en sels nutritifs. En période de fort débit, la production et la biomasse phytoplanctonique sont limitées par trois facteurs: 1) la turbidité des eaux du panache qui limite la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et donc la photosynthèse; 2) le lessivage des eaux de surface par les eaux douces de la rivière pauvres en sels nutritifs; 3) l'augmentation de la stratification qui limite les mélanges turbulents de sels nutritifs des couches profondes vers les eaux de surface où a lieu la photosynthèse.

La Fig. 20 montre l'évolution de la répartition verticale de la biomasse phytoplanctonique et des sels nutritifs, conjointement avec les propriétés thermohalines, moyennées horizontalement dans le chenal de Mingan. La période du bloom est caractérisée par des eaux mélangées et une répartition verticale homogène des sels nutritifs et de la Chla. La stratification de la colonne d'eau est d'abord initiée par la crue printanière (stratification haline), la stratification thermique n'apparaissant qu'à partir de juin. Elle est plus marquée en juillet durant la crue secondaire. Cette stratification physique a pour effet de structurer la répartition verticale des sels nutritifs et de la Chla selon un schéma classique: une couche de surface (0 à 20 m de profondeur) appauvrie en sels nutritifs et riche en phytoplancton versus une couche profonde plus riche en sels nutritifs mais plus pauvre en Chla. Le lessivage de la couche de surface pendant

les crues (diminution des sels nutritifs et de la Chla) est visible sur les profils du 15 mai et du 15 juillet.

La production secondaire et la biomasse de zooplancton suivent globalement l'évolution de la biomasse phytoplanctonique dans un premier temps (mars-avril) mais avec un retard de plusieurs semaines dû aux taux de croissance plus longs des organismes zooplanctoniques (Fig. 19). Par la suite, la production secondaire est en phase avec la production primaire et la biomasse phytoplanctonique, c'est-à-dire minimale en période de fort débit et maximale en période d'étiage. La biomasse zooplanctonique est, pour sa part, maximale pendant les périodes de crues et clairement en opposition avec la biomasse phytoplanctonique à partir de juin. Ce comportement différent s'explique par les temps de développement plus long du zooplancton, l'accumulation étant moindre en période de renouvellement rapide des eaux de l'archipel (au contraire de la production primaire qui est favorisée) et par la répartition plus homogène du zooplancton dans la colonne d'eau, en particulier dans les couches profondes, qui est plus avantageuse en période de crue.

4.2 Différences associées à l'aménagement de la rivière Romaine

Dans le scénario de gestion de la rivière Romaine (Fig. 19a), le débit hivernal est augmenté tandis que la crue printanière est partiellement retenue. Au cours de l'hiver (janvier à mars), il y a peu de production planctonique et les eaux du chenal de Mingan sont mélangées sur la verticale à l'instar des eaux du nord du golfe. L'augmentation du débit hivernal dans le scénario de gestion ne permet pas de contrer ce mélange et de maintenir une stratification significative. La concentration en sels nutritifs disponibles dans la colonne d'eau au début du printemps n'est pas affectée. L'augmentation de la stratification hivernale entraîne un court retard de quelques jours dans la production primaire en mars, de l'ordre de 5%, et un rattrapage complet en avril et avant la crue vers la mi-mai. Ce changement a un effet négligeable sur la production secondaire. La floraison printanière est principalement déterminée par la fonte des glaces et la diminution éventuelle de la crue ne change pas cette situation. La stratification

dans le chenal de Mingan nécessaire pour la floraison du phytoplancton est de nature régionale et suffisante sur l'ensemble du domaine dès mars. Le panache de la rivière s'étend plutôt vers l'ouest et il apparaît que la rivière Romaine joue un rôle relativement mineur dans l'établissement de la stratification printanière dans le chenal de Mingan. Enfin, le temps de résidence des eaux dans le chenal de Mingan n'est que de quelques jours et la circulation moyenne est gouvernée à l'échelle du détroit de Jacques-Cartier par la marée en particulier. Le mouvement induit par les eaux de la rivière elle-même et, de surcroît, par les différences de débit entre les scénarios NAT et MOD, est négligeable.

En général, la diminution des débits de la rivière Romaine au cours des périodes habituelles de production (au printemps et durant l'été) entraîne une faible augmentation de la production phytoplanctonique (et indirectement zooplanctonique) à cause de la turbidité réduite associée au panache d'eau douce. En effet, les eaux de la rivière étant généralement présentes en moins grande quantité dans le chenal de Mingan, la lumière pénètre mieux la colonne d'eau ce qui permet d'augmenter très légèrement la photosynthèse. Les débits plus forts en mars-avril et plus faibles en période de crue du scénario de gestion affectent ainsi significativement la pénétration de l'éclairement par rapport au scénario naturel (Fig. 20). Les autres effets potentiels liés à la stratification ou à la disponibilité de sels nutritifs sont négligeables (Figs. 19 et 20) et les différences entre les simulations NAT et MOD en ce qui concerne la production planctonique moyenne sont en définitive faibles. En complément, les Figs. 21 à 27 montrent les champs physiques et biogéochimiques au milieu de chaque mois de la simulation pour les scénarios NAT et MOD. On note en particulier, pour le 15 mai et le 15 juillet, des conditions de salinité nettement différentes à la surface entre les scénarios NAT et MOD (Fig. 22), ce qui entraîne de légères différences en terme de Chla et de production primaire (Figs. 25 et 26) qui sont très localisées et qui n'affectent pas les patrons généraux dans le chenal de Mingan.

Finalement et en résumé, la Fig. 28 montre les productions primaire et secondaire intégrées dans le temps (du 1er mars au 31 août) pour les scénarios NAT et MOD. Les solutions sont similaires, quantitativement et qualitativement,

tant sur le domaine complet que dans la sous-région du chenal de Mingan. Le Tableau 2 détaille les quantités cumulées de production calculées pour chacun des scénarios et pour chaque groupe planctonique. En terme de production totale, le système est un peu plus productif dans le scénario de gestion de la rivière Romaine, les différences étant au plus de 5 à 6%. Les différences détaillées pour chaque type d'organisme varient entre 1% et 7,5% au plus et la part relative des différents groupes (diatomées vs flagellés, microzooplancton vs mésozooplancton) reste globalement inchangée. Ces résultats confirment que le scénario d'aménagement proposé ne modifie pas la structure et le fonctionnement de l'écosystème planctonique du chenal de Mingan.

Tableau 2. Productions primaire et secondaire cumulées pour la période du 1 mars 2001 au 31 août 2001 dans le sous-domaine du chenal de Mingan (moyenne spatiale) pour les deux scénarios de débits naturels et modifiés de la rivière Romaine.

Production (gC/m²)	Débits naturels NAT	Débits modifiés MOD	Différence (MOD - NAT)
PRIMAIRE			
Nouvelle (basée sur les nitrates)	90,26	97,05	+7,5%
Régénérée (basée sur l'ammomium)	36,72	38,05	+3,6%
Totale	126,98	135,1	+6,4%
SECONDAIRE			
Mésozooplancton	22,46	24,15	+7,5
Microzooplancton	8,10	8,03	-0,8%
Totale	30,56	32,18	+5,3%

4.3 Scénario de débit extrême en hiver

Les résultats obtenus ci-haut motivent une étude plus approfondie de l'effet de l'augmentation du débit hivernal sur la production planctonique dans le chenal de Mingan. En effet, nous pouvons examiner si le débit hivernal plus élevé est proche d'un seuil critique au-dessus duquel les apports en sels nutritifs vers la surface pourraient être inhibés de manière significative, en d'autres mots si la

relation entre le débit et le retard de quelques jours dans la production est linéaire ou non. Dans ce but, le promoteur a fourni un nouveau scénario pour l'année 2001, improbable mais répondant à ce besoin (trait bleu à la Fig. 29a). La même suite de simulations REG et HD a été réalisée et les résultats ont été intégrés à la Fig. 29, montrant les mêmes résultats que la Fig. 19 avec, en plus, la solution correspondante à ce nouveau scénario (aussi en traits bleus). On note une fois de plus que les sels nutritifs disponibles à la fin de l'hiver ne sont pas affectés (Fig. 29d). On remarque aussi que les différences entre le scénario MOD et ce nouveau scénario sont plus faibles qu'entre les scénarios MOD et NAT pour la production primaire et les biomasses. Nous pouvons conclure que si la relation entre le débit et le retard dans la production printanière semble effectivement non linéaire, l'écart diminue en proportion avec l'augmentation du débit hivernal dans la plage des trois conditions simulées.

5. Conclusions

Le présent rapport fait état des principaux résultats de l'étude par modélisation numérique tridimensionnelle (3D) de l'effet de l'aménagement de la rivière Romaine sur la production planctonique dans le chenal de Mingan. En terme de développement, un modèle pronostique à haute définition de la circulation et de la production planctonique le chenal de Mingan a été couplé à un modèle régional du climat et de l'écosystème planctonique. Des simulations de la saison de production (mars à août) ont été réalisées pour deux scénarios d'écoulement de la rivière Romaine, le premier avec un débit journalier observé durant une année nominale, choisie comme l'année 2001, et le second établi par Hydro-Québec correspondant à l'aménagement prévu du bassin versant. Il a d'abord été montré, en conditions normales de débits de la rivière, que le modèle de circulation produit des solutions réalistes en terme de variabilité des conditions océanographiques à l'échelle saisonnière, événementielle et tidale, en particulier pour le comportement du panache de la rivière Romaine. Le couplage de ce simulateur physique avec le modèle d'écosystème planctonique a ensuite permis de simuler la réponse de l'écosystème en terme de production et de biomasse à

la variabilité naturelle des conditions océaniques dans le chenal de Mingan, puis aux modifications du milieu générées par l'aménagement de la rivière Romaine.

En conditions naturelles de débit de la rivière, le modèle produit un cycle de production planctonique cohérent qui montre classiquement une floraison printanière massive suivie d'un régime estivale relativement productif qui est principalement piloté par les mélanges dus à la marée, les résurgences côtières et les conditions océaniques dans le détroit de Jacques-Cartier. L'analyse comparative de la simulation considérant les modifications du débit de la rivière Romaine montre que ces modifications n'affectent pas significativement la production et le fonctionnement de l'écosystème, ceux-ci-ci étant principalement dominés par le renouvellement continu des eaux de l'archipel et du chenal de Mingan par les eaux du détroit Jacques-Cartier. Le scénario de gestion des débits de la rivière est un peu plus productif (+ 5-6%) que le scénario naturel, mais ces différences sont négligeables en regard de la variabilité naturelle du système. Nous pouvons donc conclure que le rôle de la rivière sur le fonctionnement et la production de l'écosystème apparaît secondaire par rapport aux forçages saisonniers (convection hivernale), tidaux (marée) et synoptiques (échanges avec le détroit et résurgences côtières) dans l'archipel. L'effet potentiel de l'aménagement de la rivière Romaine est vraisemblablement négligeable.

La modification du débit de la rivière Romaine, soit en condition d'exploitation normale ou exagérée avec un scénario de débit hivernal élevé, influence la production principalement via deux effets : D'abord, l'augmentation du débit hivernal augmente légèrement la stratification des eaux, sans toutefois affecter la profondeur des mélanges (jusqu'au fond). La concentration en sels nutritifs disponibles dans la colonne d'eau au début du printemps n'est pas affectée. L'augmentation de la stratification hivernale entraîne d'abord une légère diminution de la production primaire en mars, de l'ordre de 5%, et un rattrapage complet en avril et avant la crue vers la mi-mai. Ce résultat est équivalent à un retard de quelques jours dans la production primaire. Ce changement a un effet négligeable sur la production secondaire. L'effet de la modification du débit sur la

stratification dans le chenal de Mingan et la production planctonique pendant et après la crue est aussi négligeable. Il apparaît que le système planctonique du chenal de Mingan est sensible à l'absence ou à la présence d'une stratification déterminée par le cycle saisonnier à l'échelle régionale, la fonte des glaces de mer et le réchauffement vernal. Les modifications proposées pour la rivière Romaine ne sont pas suffisantes pour affecter ce régime; la stratification demeure toujours très faible en hiver et forte au printemps et à l'été. Les écarts associés à l'augmentation prévue du débit de la rivière Romaine en hiver et la réduction durant les crues sont trop faibles en amplitude pour altérer significativement ces variations. Le deuxième effet provient du changement dans la turbidité associée à l'eau douce de la rivière, limitant la lumière nécessaire à la photosynthèse dans la colonne d'eau. Ces différences demeurent limitées dans le temps et dans l'espace.

Remerciements

Les auteurs remercient sincèrement Danielle Messier, Conseillère environnement, Michel Bérubé, Chargé de projet environnement, Dominique Caron et Kathleen Montour, Conseillères SIRS, de la firme Hydro-Québec pour leur support et leur aide technique dans la réalisation de ce projet. Nous remercions aussi James Caveen, Serge Demers, Nancy Otis et Diane Fortin pour la réalisation de différentes étapes de ce projet.

Références

- Bourque MC, Kelley D (1995) Evidence of wind-driven upwelling in Jacques-Cartier Strait. *Atmos.–Ocean*, **33**, 621–637.
- Chifflet M, Le Fouest V, Starr M, Saucier F, Zakardjian B (2004) Exceptional productivity of the St. Lawrence in 1999 as revealed by a multi-annual modeling study. Final Report of the Fisheries Oceanography Committee 2004 Annual Meeting, CSAS, DFO, Proceeding Series 2004/019 : 68-78.
- de Lafontaine Y, Demers S, Runge JA (1991) Pelagic food-web interactions and productivity in the Gulf of St. Lawrence: A Perspective, p.99-123. *In* The Gulf of St. Lawrence: small ocean or big estuary?, Edited by J. -C. Therriault, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 113.
- El-Sabh, MI (1976) Surface circulation patterns in the Gulf of St. Lawrence. *Journ Fish Res Bd Can.* Vol 33: 124-138.
- Faucher M, Caya D, Saucier FJ, Laprise R (2004) Interaction between atmosphere and ocean-ice regional models over the Gulf of St. Lawrence area, Canada. *Atmos-Ocean* 45(2):85-100.
- Fauchot J, Saucier FJ, Levasseur M, Roy S, Zakardjian B (accepté). Importance of wind-driven river plume dynamics for the development of toxic *Alexandrium tamarense* blooms in the Lower St. Lawrence Estuary (Canada): a modeling study, *Harmful Algae*.
- Koutitonsky VG, Bugden GL (1991) The Physical Oceanography of the Gulf of St. Lawrence: A Review with Emphasis on the Synoptic Variability of the Motion, p. 57-90. *In* J.-C Thériault (ed.) The Gulf of St. Lawrence: small ocean or big estuary? Can. Spec Publ Fish Aquat Sci 113.
- Han G J, Loder W, Smith P (1999) Seasonal-mean hydrography and circulation in the Gulf of St. Lawrence and on the Eastern Scotian and Southern Newfoundland Shelves, *J Phys Oceano*, 29, 1279-1301.
- Hydro-Québec & Genivar (2005) Complexe de la rivière Romaine, Qualité de l'eau, Rapport sectoriel 34 p.
- Hydro-Québec (en prép.) Complexe de la Romaine – Étude d'impact sur l'environnement. Volume 2 : Milieu physique – Description et modifications prévues.
- Hydro-Québec (en prép.) Complexe de la Romaine – Étude d'impact sur l'environnement. Volume 9 : Méthodes.
- Le Fouest V, Zakardjian B, Saucier FJ, Starr M (2005) Seasonal versus synoptic variability in planktonic production in a high-latitude marginal sea: the Gulf of St. Lawrence (Canada). *J Geophys Res C* 110(C9): C09012.
- Le Fouest V, Zakardjian B, Saucier FJ, Cizmeli SA (2006) Application of remotely SeaWiFS- and AVHRR-derived data for mesoscale and regional validation of a 3-D high-resolution physical-biological coupled model of the Gulf of St. Lawrence (Canada). *J Mar Syst* 60:30-50.
- Maps F, Zakardjian B, Plourde S, Saucier F (en prép.). Study of the interactions between the hydrodynamics and the biological dynamics of *Calanus finmarchicus* (Copepoda, Calanoida) in the Gulf of St. Lawrence (Eastern Canada).
- Nieke B, Reuter R, Heuermann R, Wang H, Babin M, Therriault JC (1997) Light

- absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM), in the St. Lawrence Estuary (Case 2 waters), *Cont Shelf Res* 17(3):235-252.
- Pellerin P, Ritchie H, Saucier FJ, Roy F, Desjardins S, Valin M, Lee V (2004) Impact of a two-way coupling between an atmospheric and ocean-ice model over the Gulf of St. Lawrence. *Mon Weather Rev* 132(6): 1379-1398.
- Plourde J, Therriault JC (2004) Climate variability and vertical advection of nitrate in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Mar Ecol Prog Ser* 279:33-43.
- Saucier FJ, Senneville S, Prinsenberg S, Roy F, Gachon P, Caya D, Laprise R (2004) Modeling the ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Strait, Canada. *Clim Dyn* 23:303-326.
- Saucier FJ, Roy F, Gilbert D, Pellerin P, Ritchie H (2003) Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, *J Geophys Res C* 108(C8):3269-3289.
- Savenkoff C, Vézina AF, Roy S, Klein B, Lovejoy C, Therriault JC, Legendre L, Rivkin R, Bérubé C, Tremblay JE, Silverberg N (2000) Export of biogenic carbon and structure and dynamics of the pelagic food web in the Gulf of St. Lawrence. Part 1. Seasonal Variations. *Deep Sea Res, Part II*, 47, 585-607.
- Sourisseau M, Simard Y, Saucier FJ (2006) Krill aggregation in the St. Lawrence system and exchange between the Gulf and the Lower Estuary. *Mar Ecol Prog Ser* 314:257-270.
- Sourisseau M, Simard Y, Saucier FJ (2004) Aggregation and advection of macro-zooplankton in the St. Lawrence System. *ICES CM/2004 P:06*, 1-24.
- Steven DM (1974) Primary and secondary primary production in the Gulf of St. Lawrence, McGill Univ. *Mar Sci Centre MS Rep*, 26, 116 p.

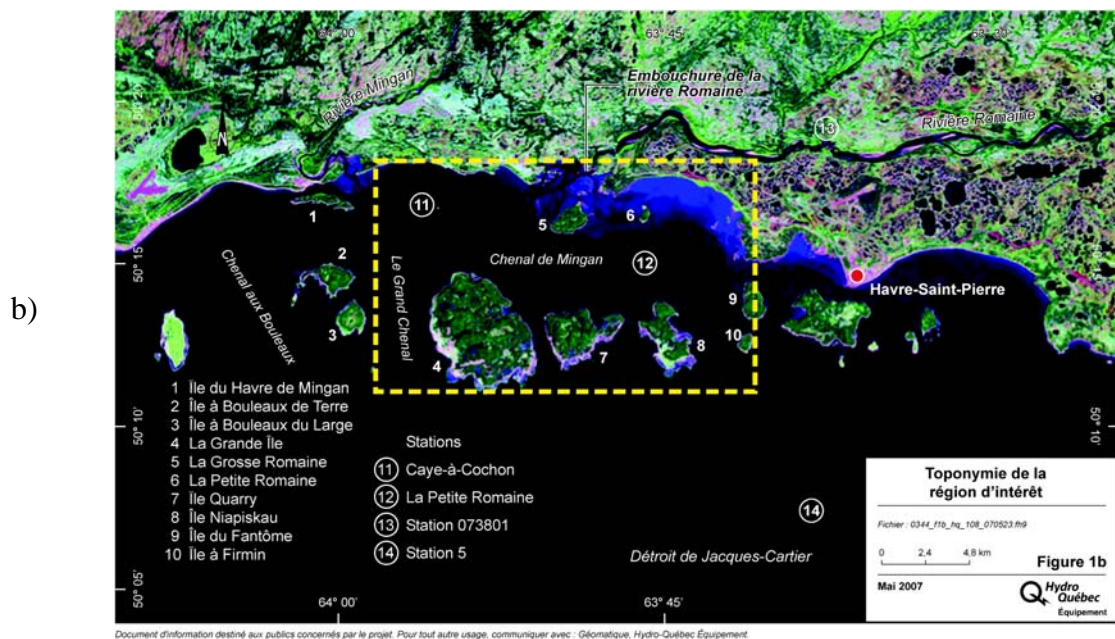
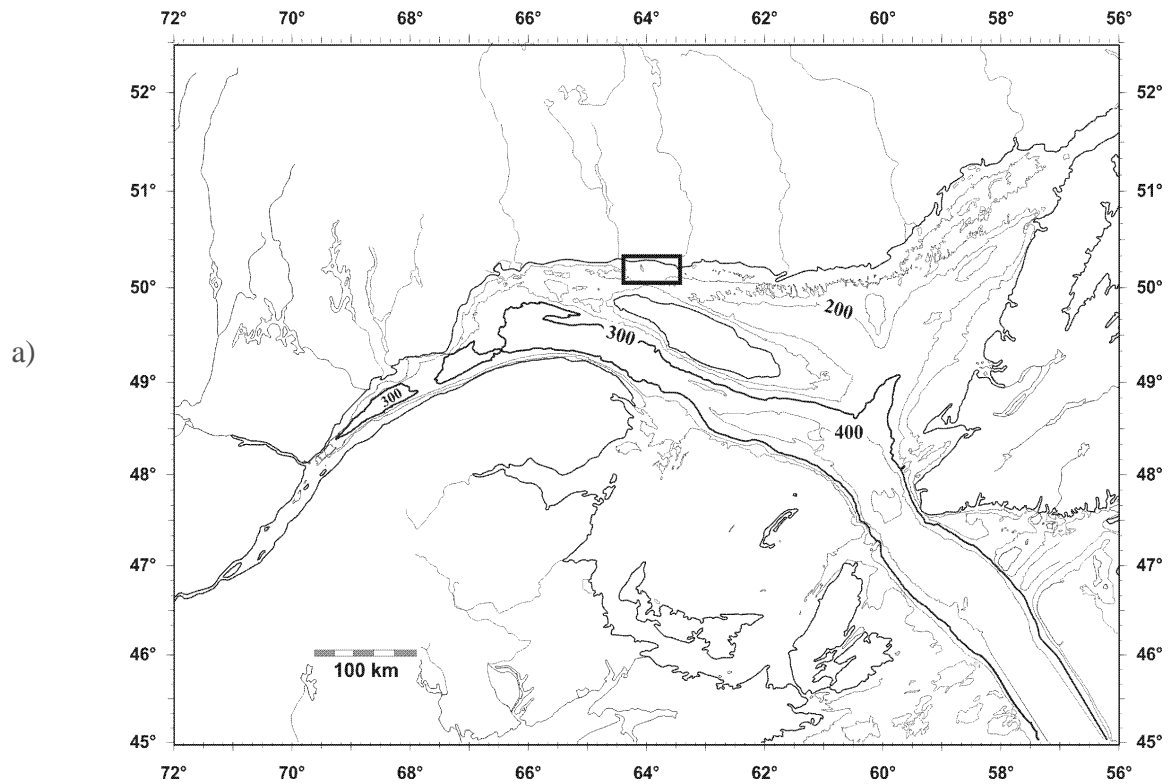


Figure 1 : Carte : a) golfe et estuaire du Saint-Laurent (profondeur en m). La région d'étude du chenal de Mingan est encadrée. b) toponymie de la région d'intérêt

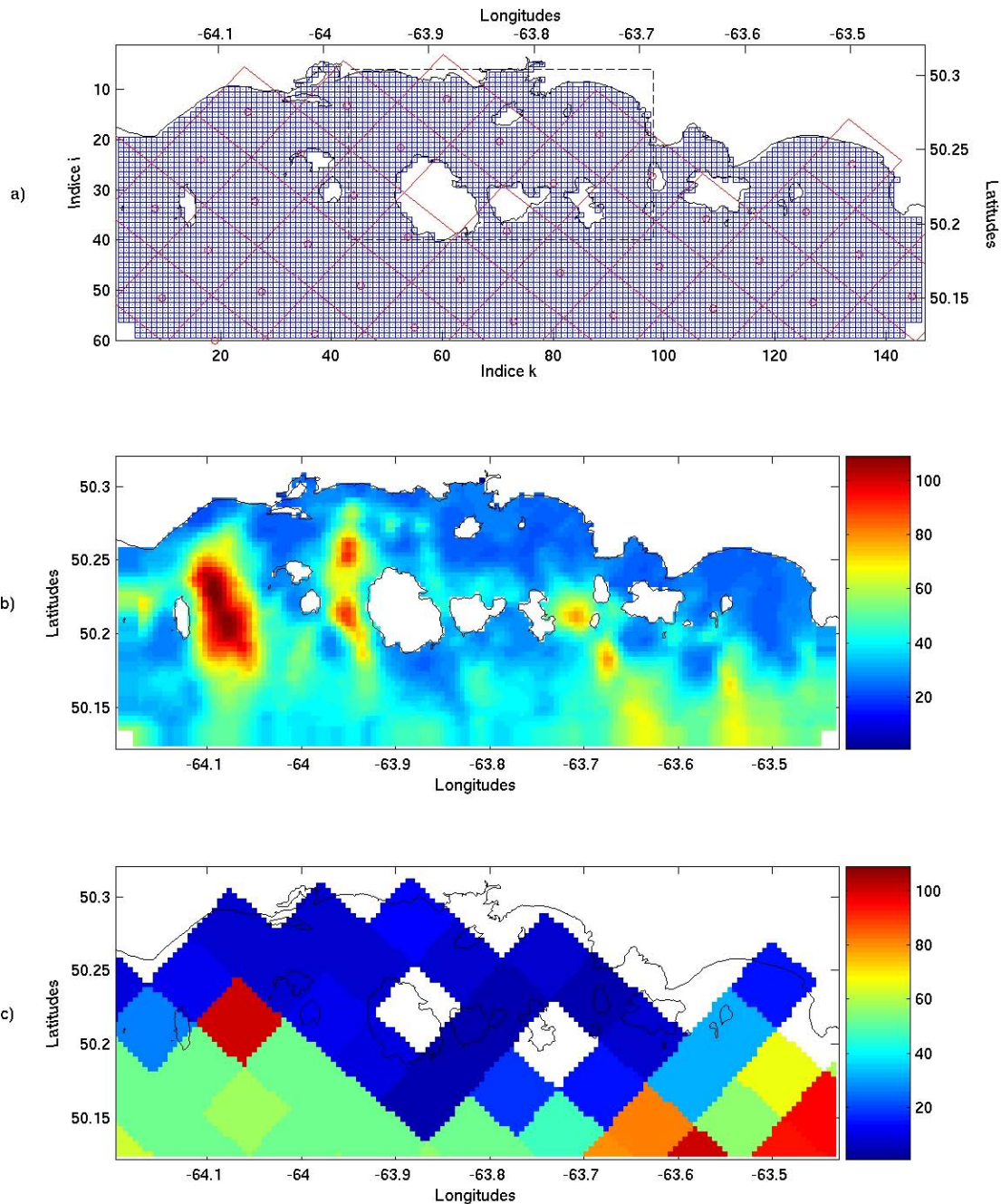


Figure 2 : Bathymétrie et grilles numériques du domaine HD. Les axes sont en coordonnées latitude/longitude d'une part et en indices de la grille HD d'autre part (utilisés pour des références ultérieures). (a) Grille du modèle haute définition HD avec une résolution horizontale de 400 m (la résolution verticale est de 3 m près de la surface et 5 m en profondeur). La grille du simulateur régional REG avec 5 km de résolution horizontale est montrée en rouge. Les points rouges correspondent à des positions de contrôle entre les simulateurs REG et HD. Le sous-domaine du chenal de Mingan est délimité par le trait pointillé; (b) Profondeurs en m de la grille HD obtenues en interpolant les sondages bathymétriques du Service Hydrographique du Canada ; (c) Profondeur en m de la grille du simulateur REG, montrant la faible résolution des complications topographiques de la région d'étude.

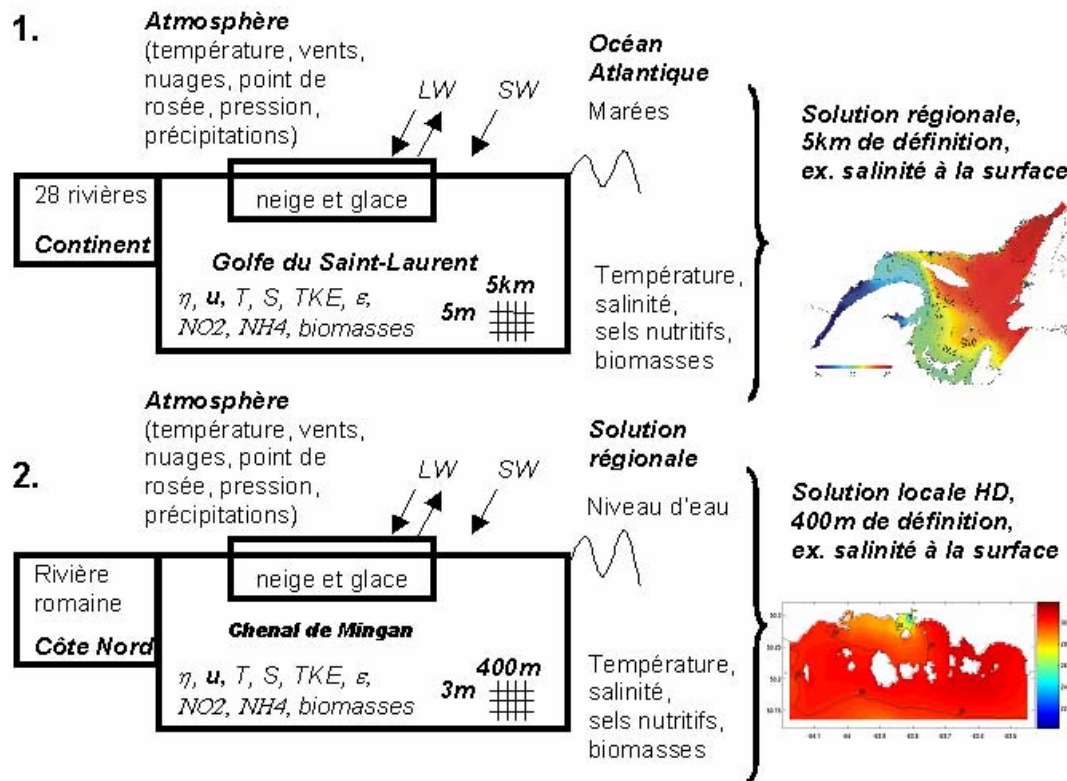


Figure 3 : Schéma de la stratégie de pilotage du simulateur HD à partir du simulateur REG. À l'étape 1, le simulateur du golfe du Saint-Laurent est exécuté pour l'année 2001 en utilisant les contraintes suivantes: les conditions océaniques aux détroits de Belle-Isle et de Cabot (marées, température, salinité, sels nutritifs, provenant du programme de monitoring Atlantique de Pêches et Océans Canada); les conditions atmosphériques aux périodes de trois heures analysées par le simulateur GEM (Service météorologique du Canada); les débits journaliers observés des 28 principaux tributaires du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent incluant la rivière Romaine (de sources diverses incluant Hydro-Québec). À l'étape 2, les solutions REG sont utilisées pour piloter les frontières ouvertes du simulateur HD. Les mêmes équations de conservation et champs de contraintes hydrologique et atmosphérique sont utilisés pour chaque domaine.

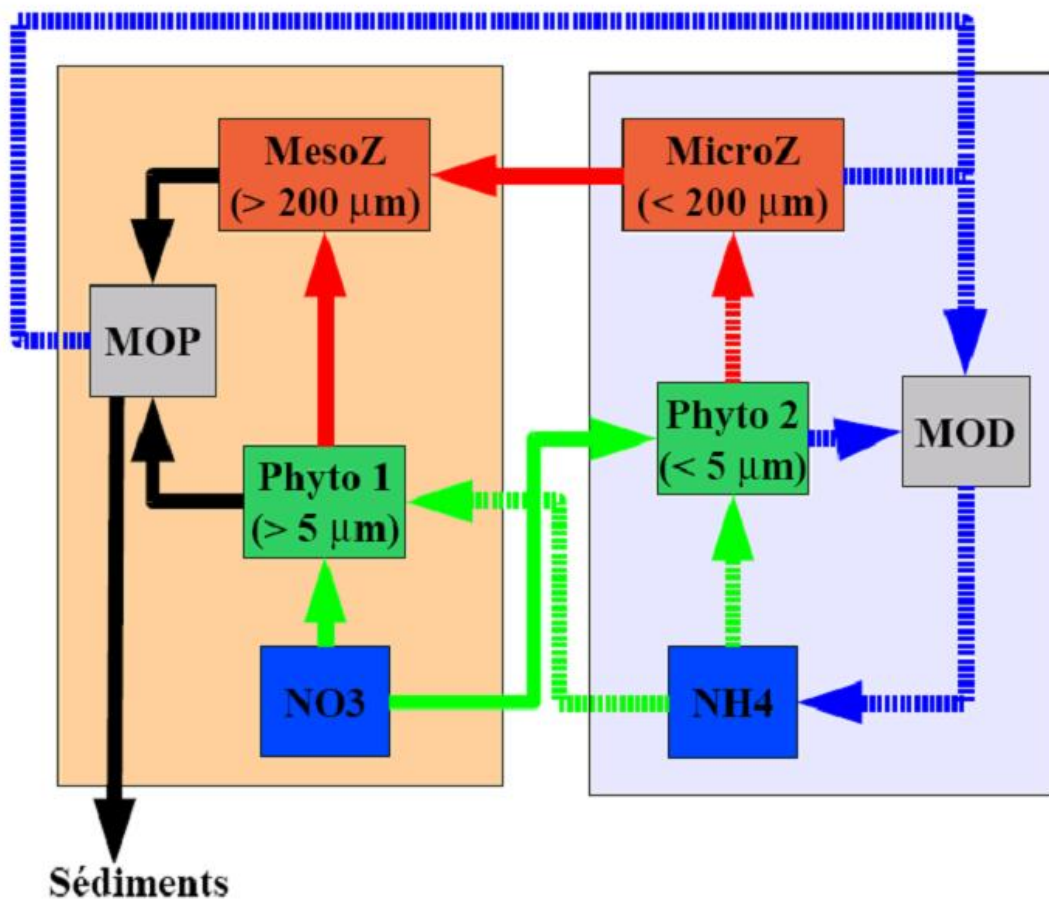


Figure 4 : Schéma conceptuel du modèle d'écosystème illustrant la compétition entre les deux chaînes trophiques, respectivement herbivore (à gauche, traits continus) et microbienne (à droite, traits pointillés); la couleur des flèches montre la nature des interactions entre les variables: le vert pour la production primaire (photosynthèse et assimilation des nutriments), le rouge pour la prédation, le bleu pour la régénération de la matière organique et le noir pour l'exportation *via* la production de matière organique particulaire (pelotes fécales et cellules mortes).

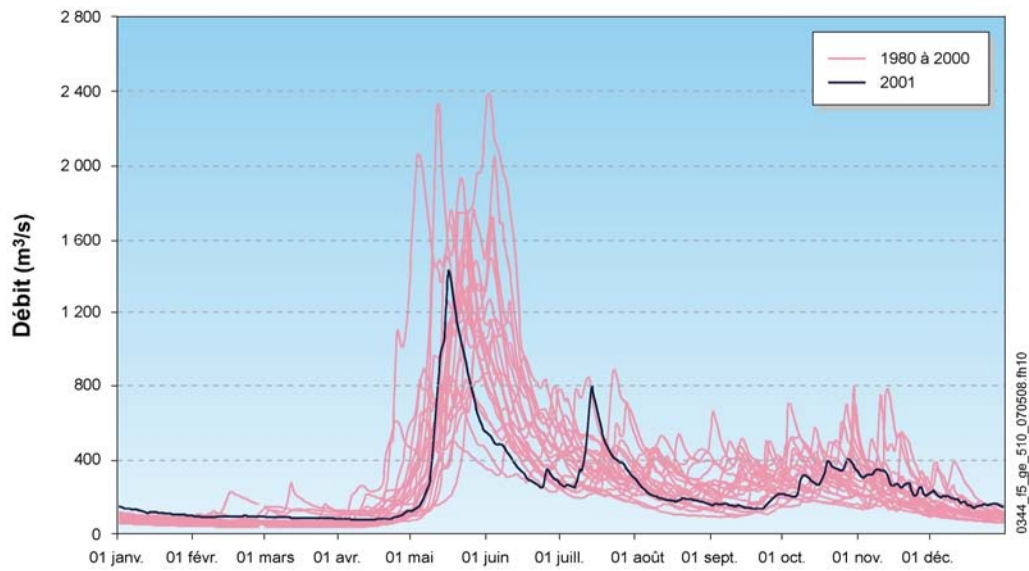


Figure 5 : Débits journaliers de la rivière Romaine observés à la station d’observation d’Hydro-Québec pour chaque année entre 1980 et 2001. L’année 2001, choisie comme année témoin, est montrée en trait gras.

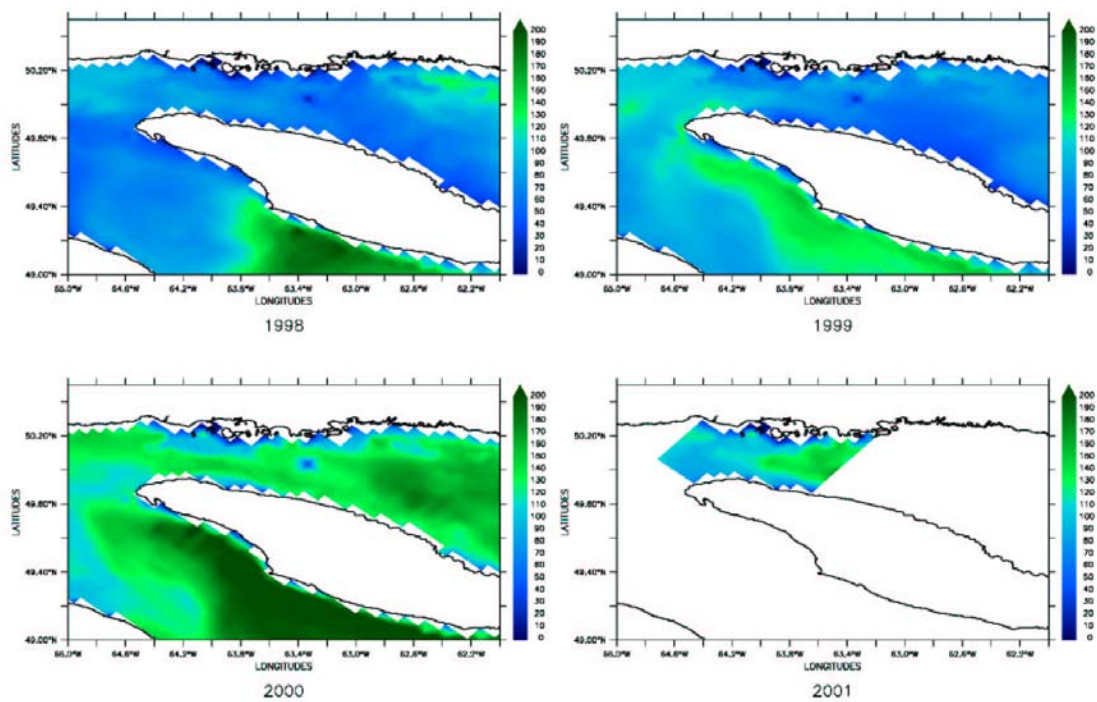


Figure 6 : Variabilité inter-annuelle de la biomasse phytoplanctonique en mg-Chl m^{-2} simulée à l'échelle régionale. La concentration est intégrée verticalement et moyennée pour les mois de mars, avril et mai pour les années 1998 à 2001. Pour l'année 2001, seulement la région d'intérêt est montrée car les fichiers sont sauvegardés à haute fréquence pour piloter le simulateur HD.

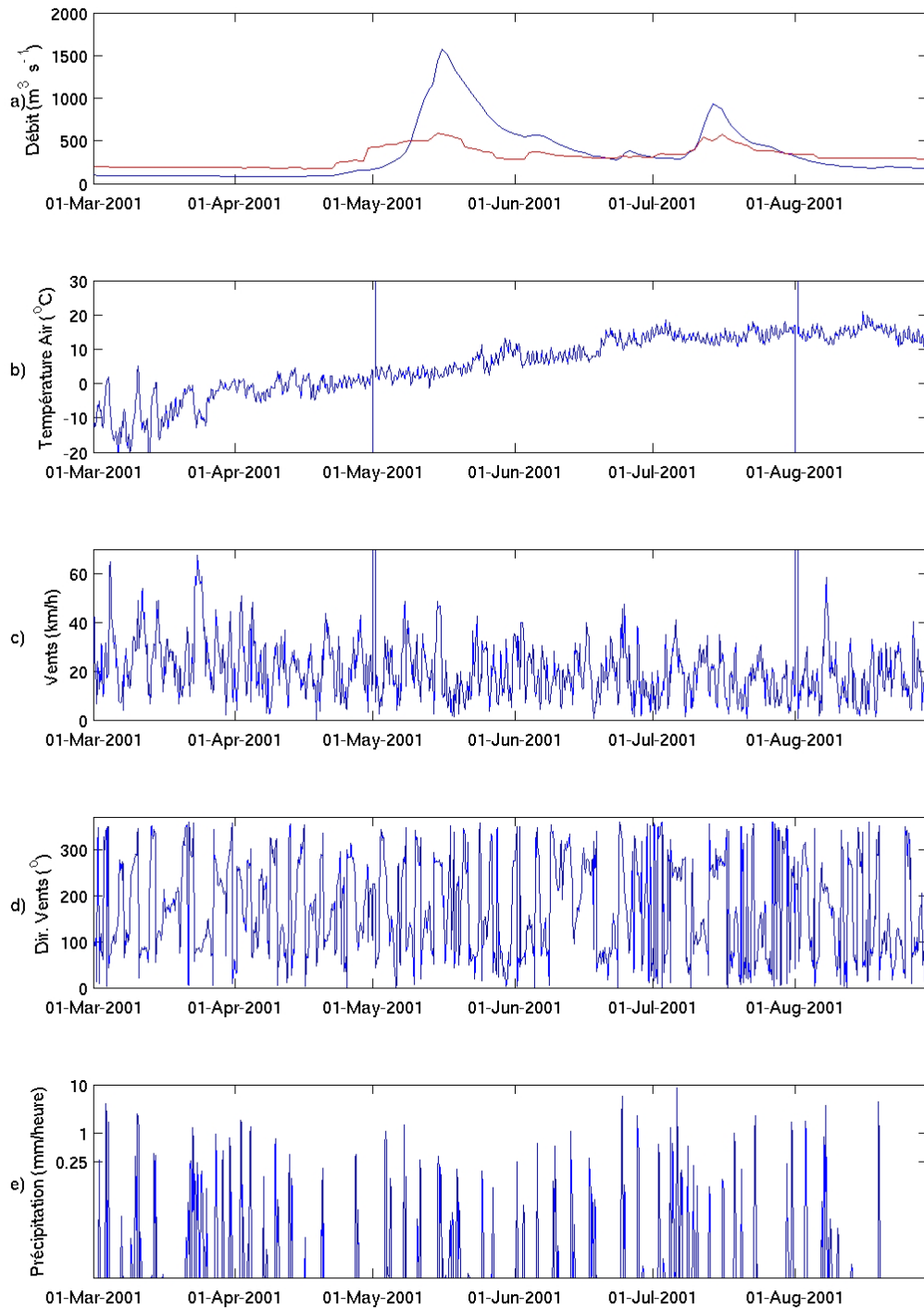


Figure 7 : Contraintes atmosphériques et hydrologiques moyennes sur le domaine HD durant la période de simulation. (a) Série temporelle journalière du débit naturel (bleu) et modifié (rouge) de la rivière Romaine pour l'année 2001 ; (b) température de l'air ; (c) intensité du vent ; (d) direction du vent ; (e) précipitations.

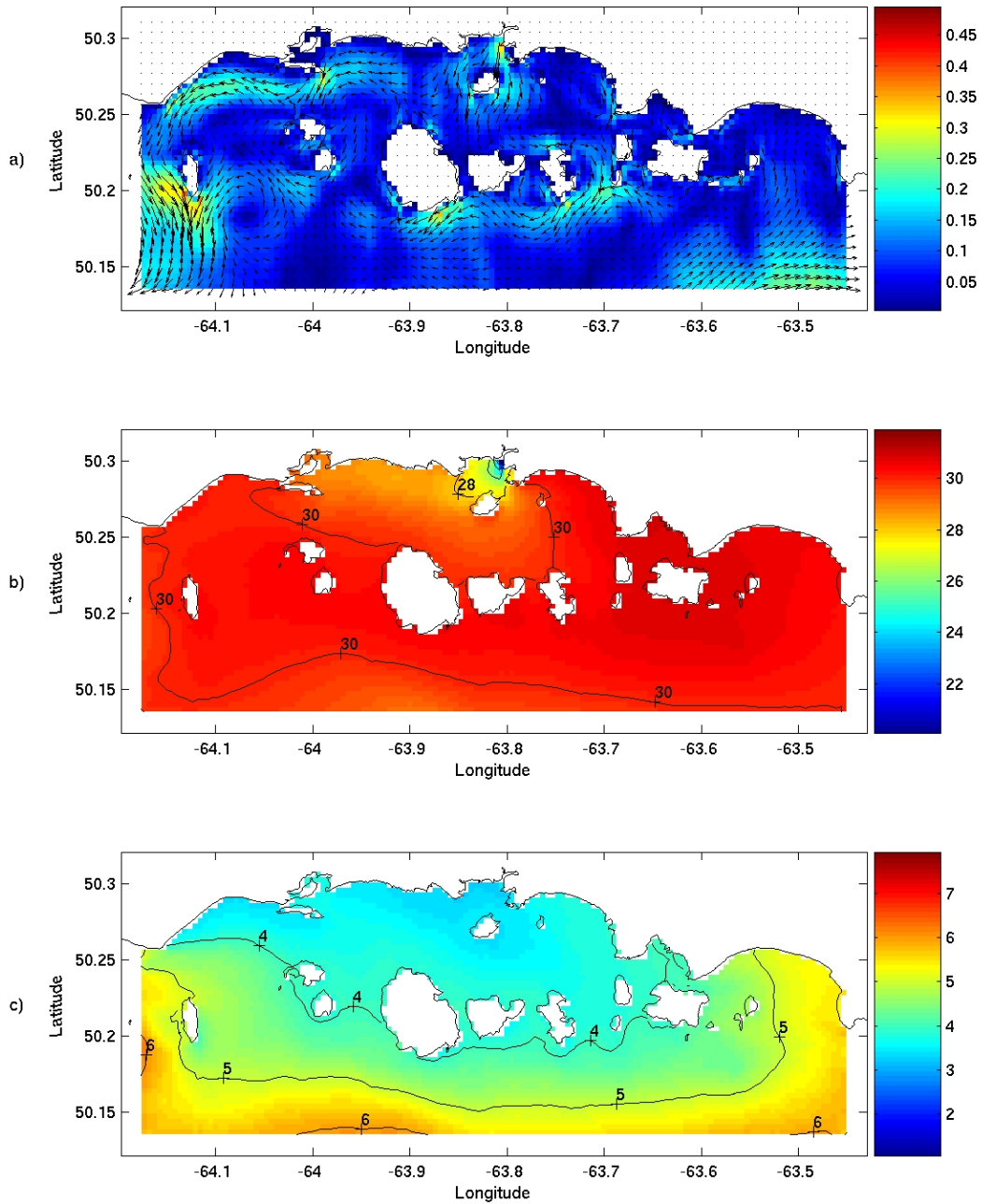


Figure 8 : Champs physiques de surface (0-3m) moyennés à partir des solutions horaires sur la période du 1er mars au 31 août 2001. (a) courants en ms-1 ; (b) Salinité en surface montrant l'influence générale du panache de la rivière Romaine ; (c) Température en °C.

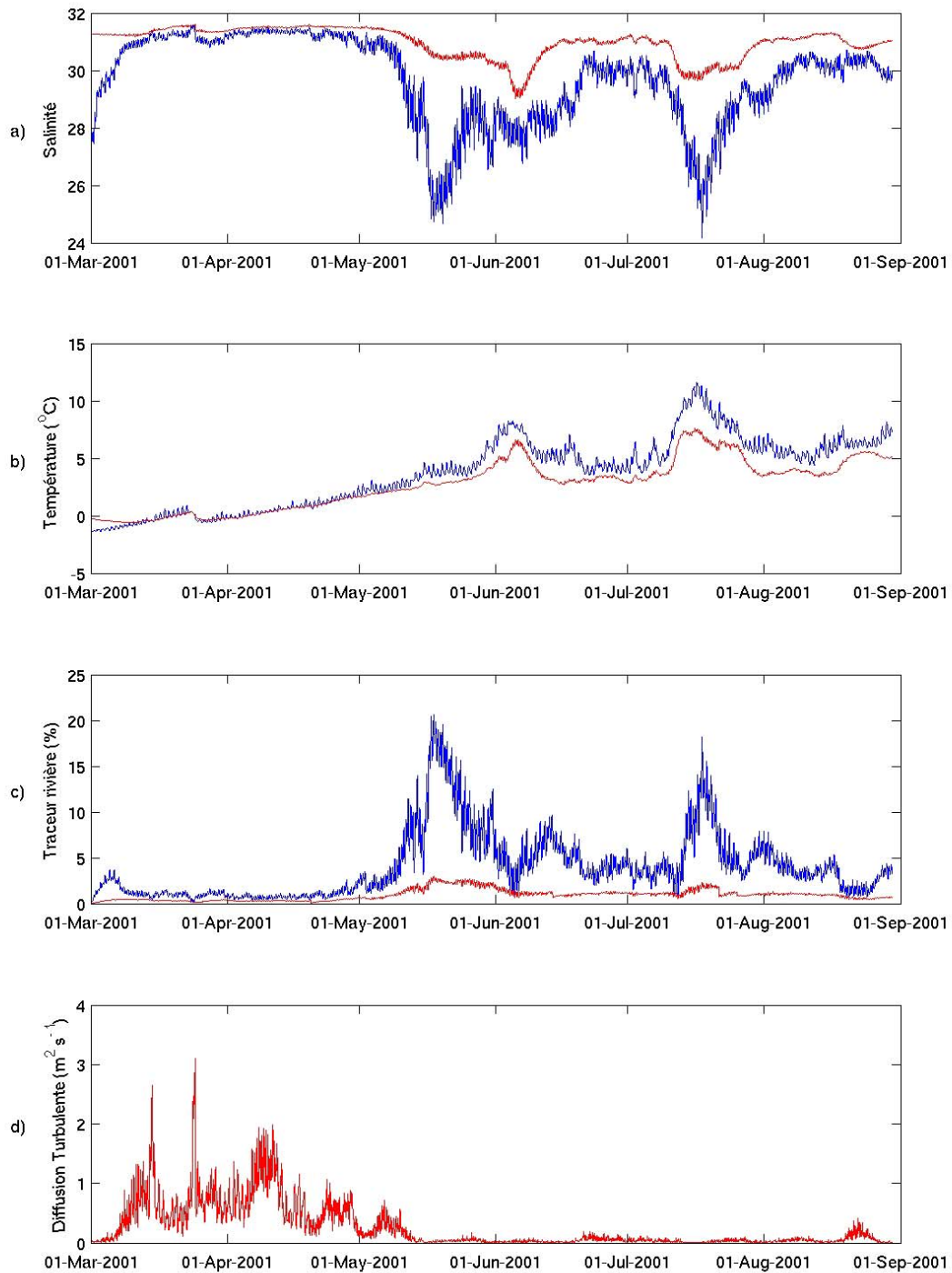


Figure 9 : Série temporelle horaire de la solution HD sur le chenal de Mingan montrant les moyennes sur la couche de surface (0-3m) (bleu) et sur l'ensemble du domaine volumique HD (rouge). (a) Salinité ; (b) Température en °C ; (c) marqueur des eaux de la rivière Romaine ; (d) coefficient de diffusion turbulente verticale.

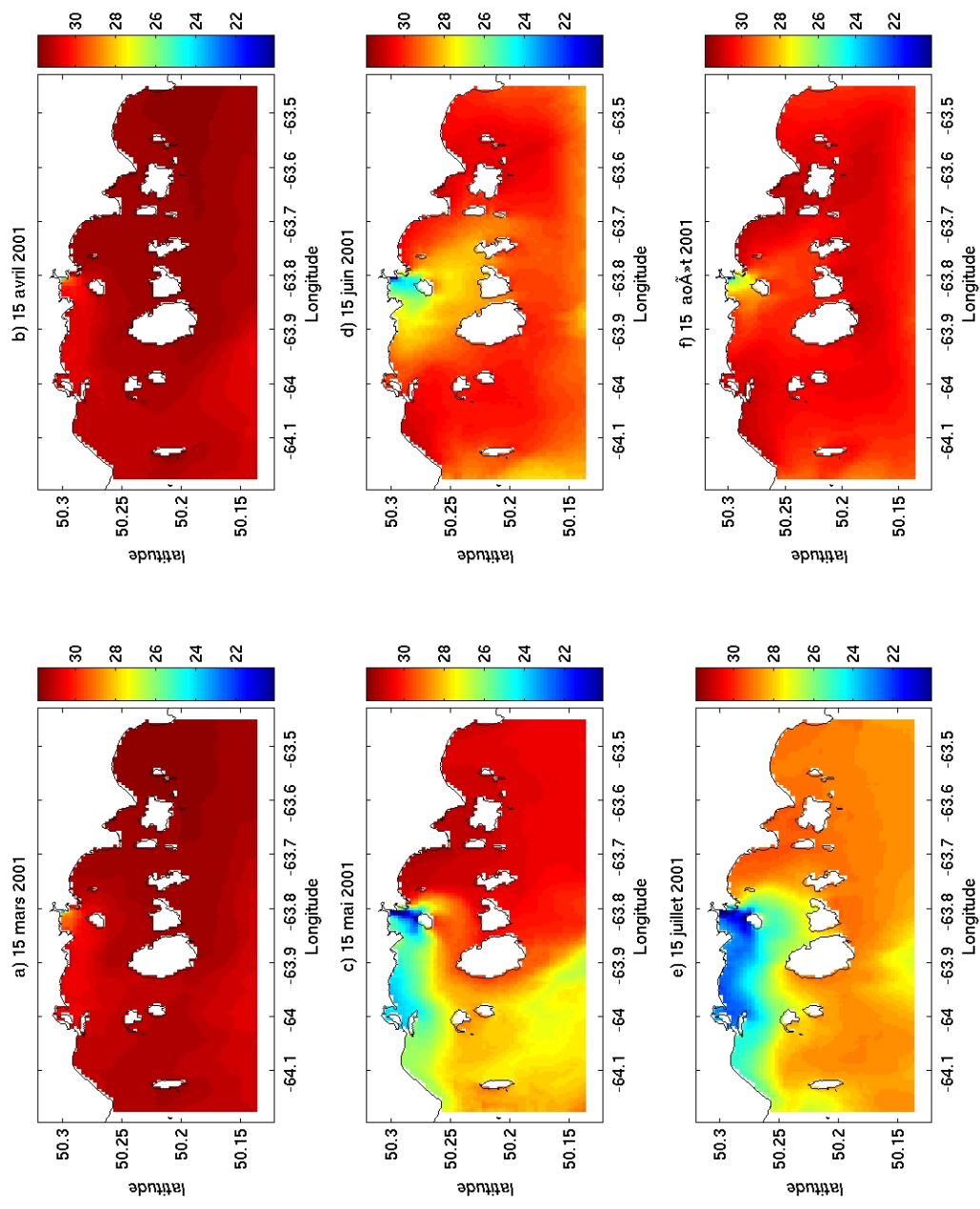


Figure 10 : Moyenne quotidienne de la salinité de surface (0-3m) simulée par HD en 2001. (a) 15 mars ; (b) 15 avril, (c) 15 mai, (d) 15 juin, (e) 15 juillet, (f) 15 août.

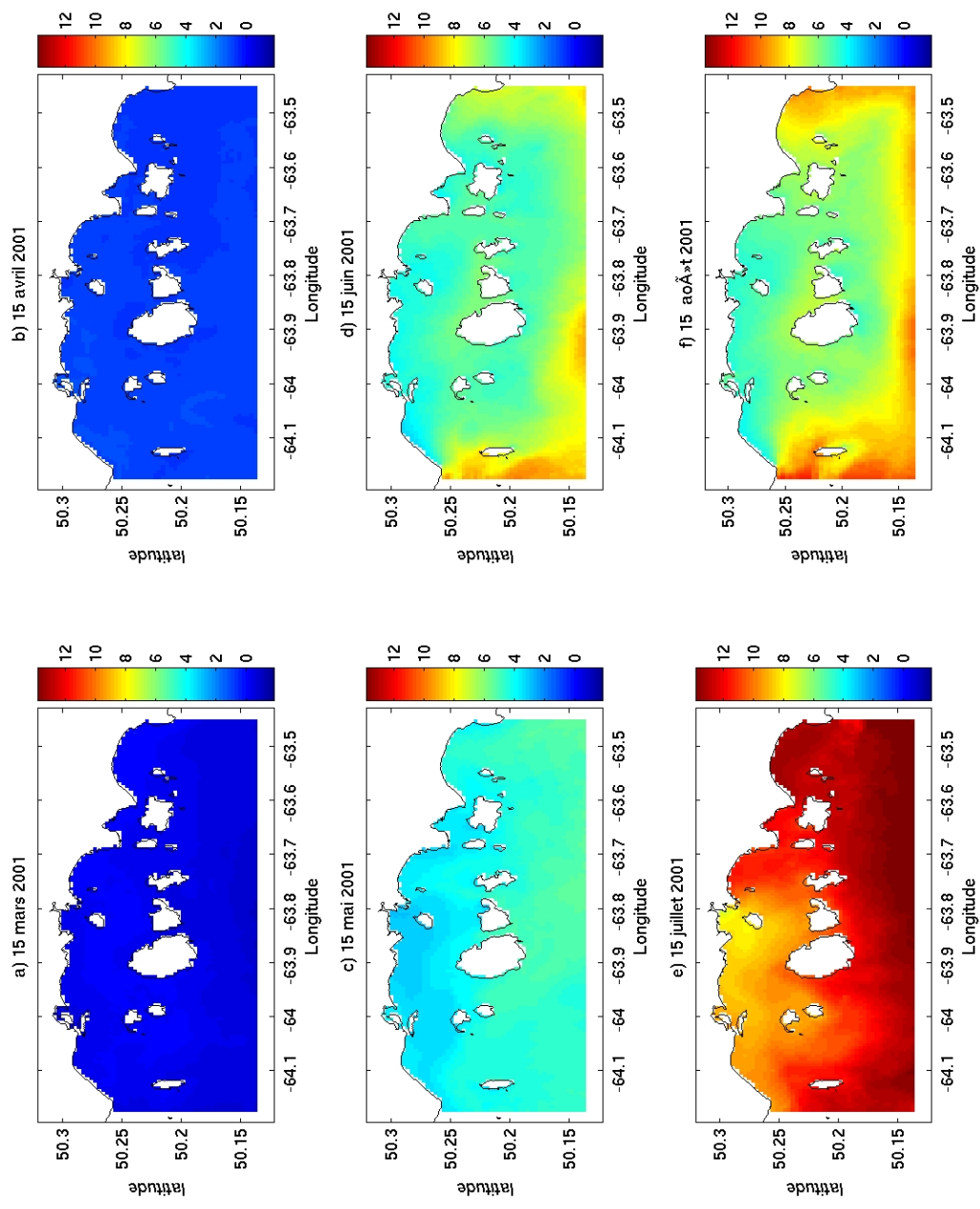


Figure 11: Moyenne quotidienne de la température de surface (0-3m) (en °C) simulée par HD en 2001. (a) 15 mars ; (b) 15 avril, (c) 15 mai, (d) 15 juin, (e) 15 juillet, (f) 15 août.

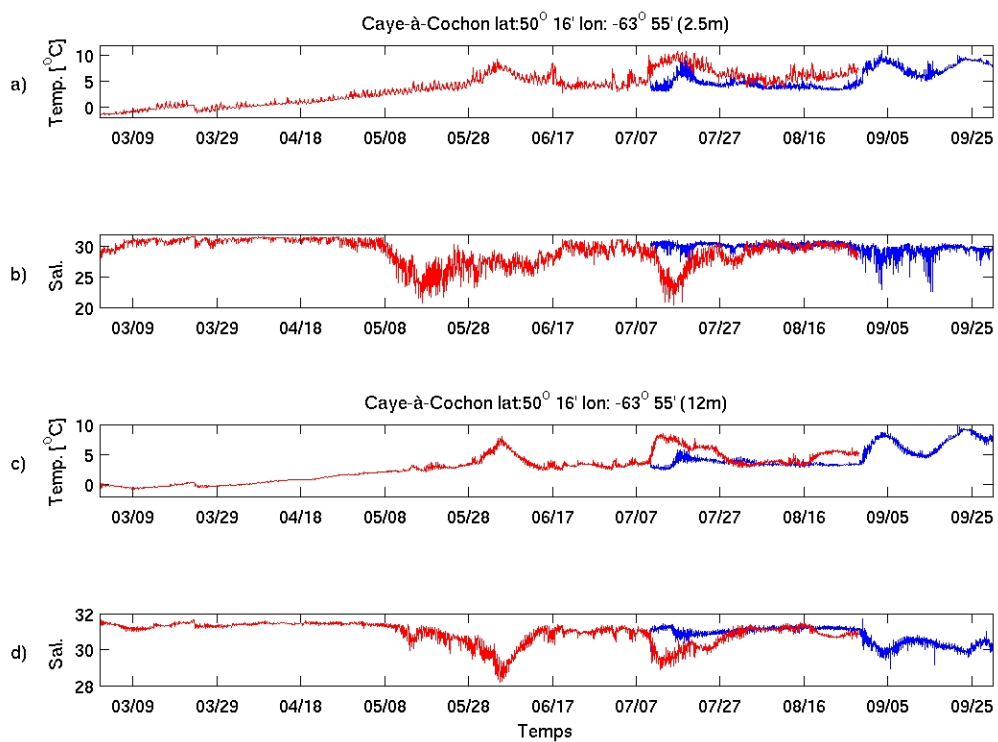


Figure 12: Comparaison entre les résultats de HD en 2001 (en rouge) et les observations de température et de salinité acquises à l'aide d'une sonde CTD à la station Caye-à-Cochon (bleu) en 2005. (a) et (b) montrent la température et la salinité près de la surface et (c) et (d) à 12m de profondeur.

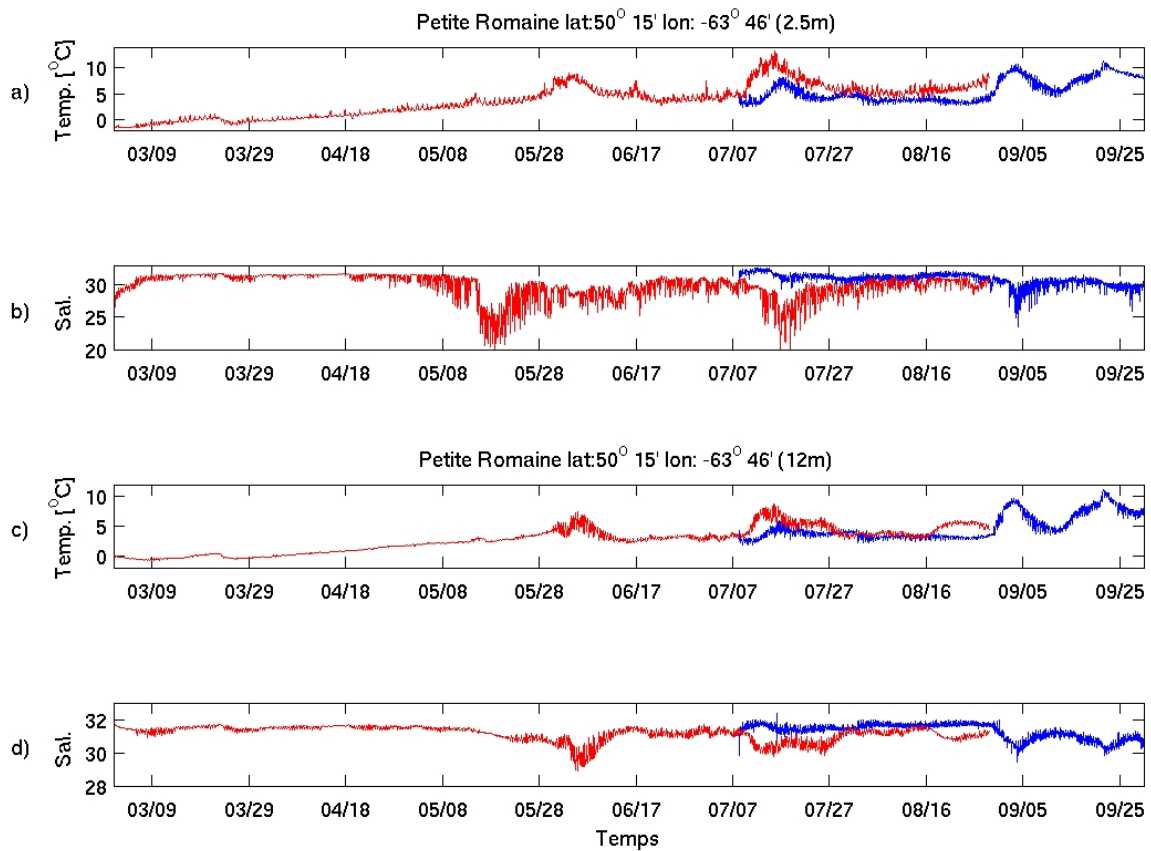


Figure 13: Comparaison entre les résultats de HD en 2001 (en rouge) et les observations de température et de salinité acquises à l'aide d'une sonde CTD à la station Petite Romaine (bleu) en 2005. (a) et (b) montrent la température et la salinité près de la surface et (c) et (d) à 12m de profondeur.

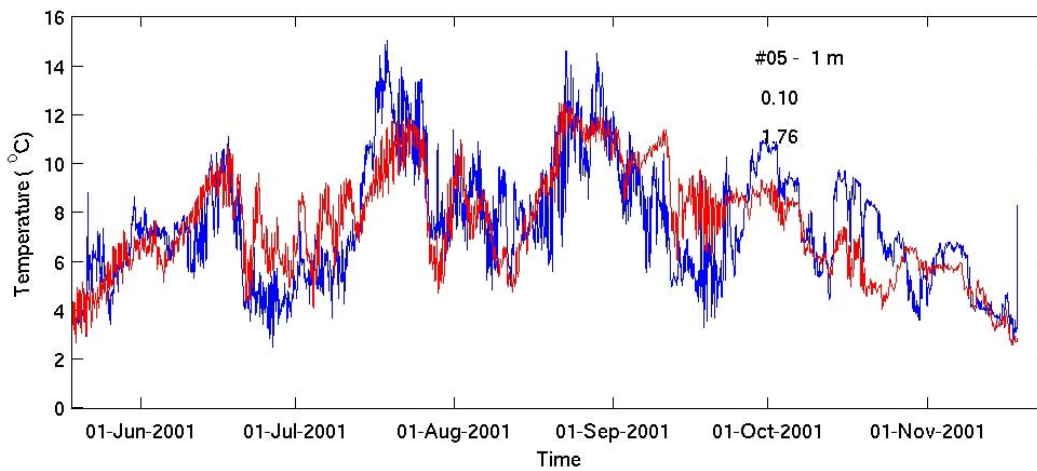


Figure 14: Comparaison entre la température calculée par REG (en rouge) et la température observée à la station de Havre St-Pierre (50°06.5'N 63°38.5'W) à 1m de profondeur (bleu). Les données proviennent du programme de monitoring du ministère des Pêches et des Océans. Les données normalement acquises aussi à 100m de profondeur à cette station ne sont pas disponibles pour 2001.

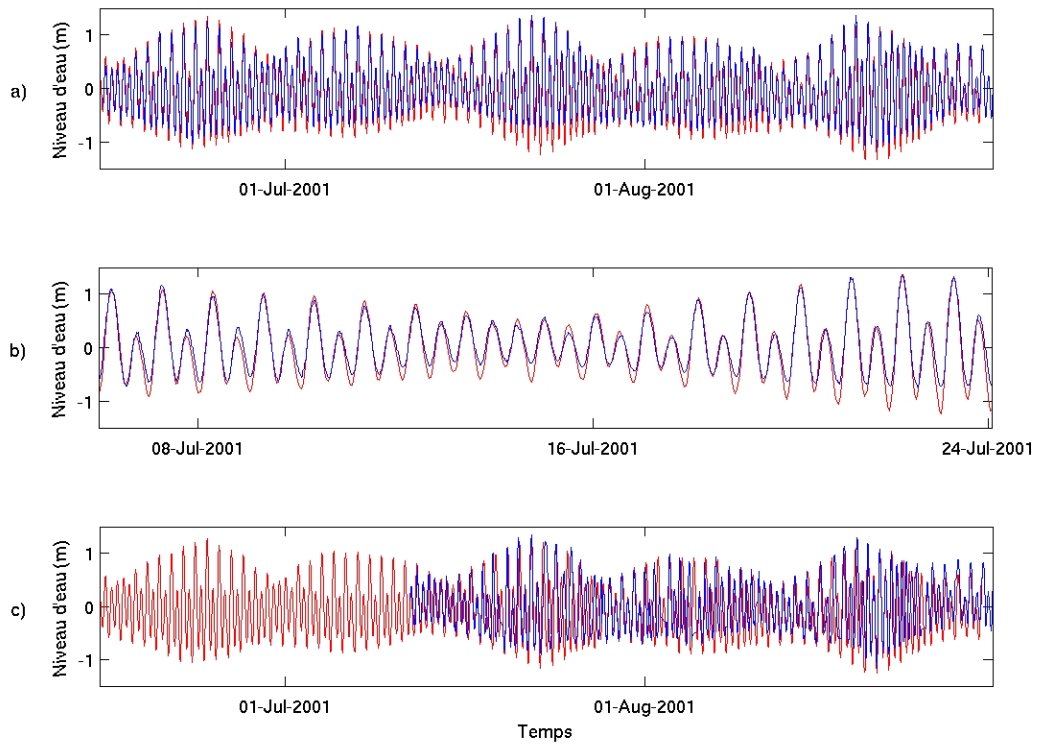


Figure 15: Comparaison entre les synthèses harmoniques du niveau d'eau aux stations 0721 et 0691. Les observations sont en bleu et les solutions HD en rouge. (a) Station 0721 (indices de grille $i=8$, $k=74$ sur la Fig. 1a) pour la durée de la simulation ; (b) Station 0721 montrant un cycle vives-eaux mortes-eaux ; (c) Station 0691 (indices $i=8$, $k=84$ sur la Fig. 1a). Les moyennes ont été soustraites pour chacune des séries.

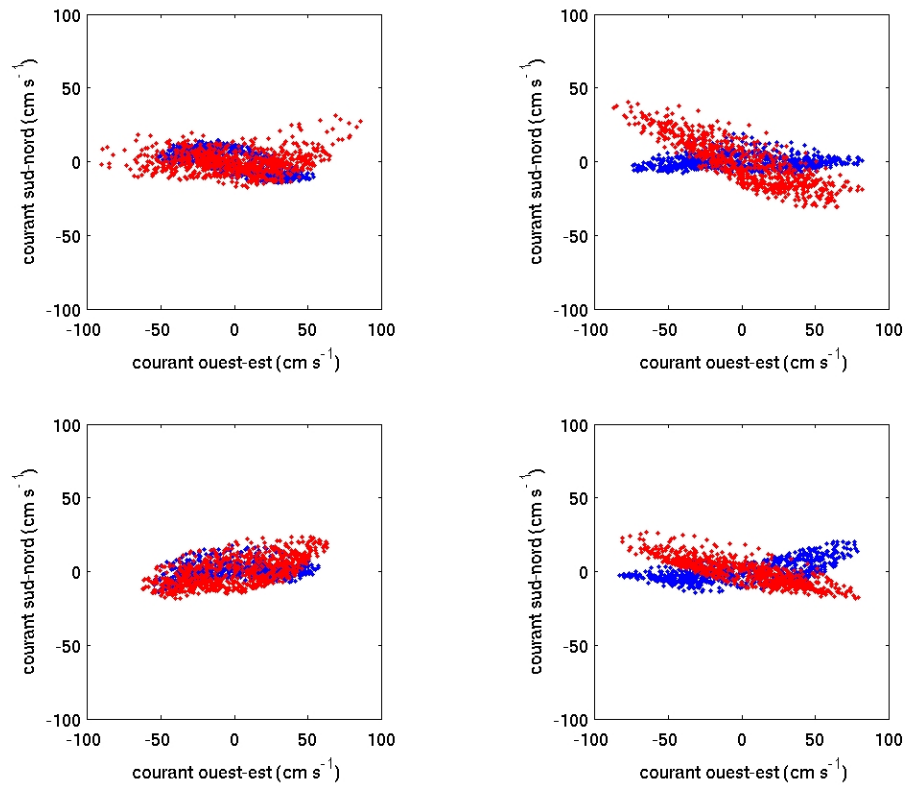


Figure 16: Comparaison entre les synthèses harmoniques des courants horizontaux pour la période du 10 juillet au 30 août 2001 aux stations Petite Romaine (colonne de gauche) et Caye-à-Cochon (colonne de droite). Les panneaux du haut montrent les courants horaires observés (bleu) et calculés (rouge) près de la surface les panneaux du bas à 12 m de profondeur. Les données de courants ont été acquises en 2005.

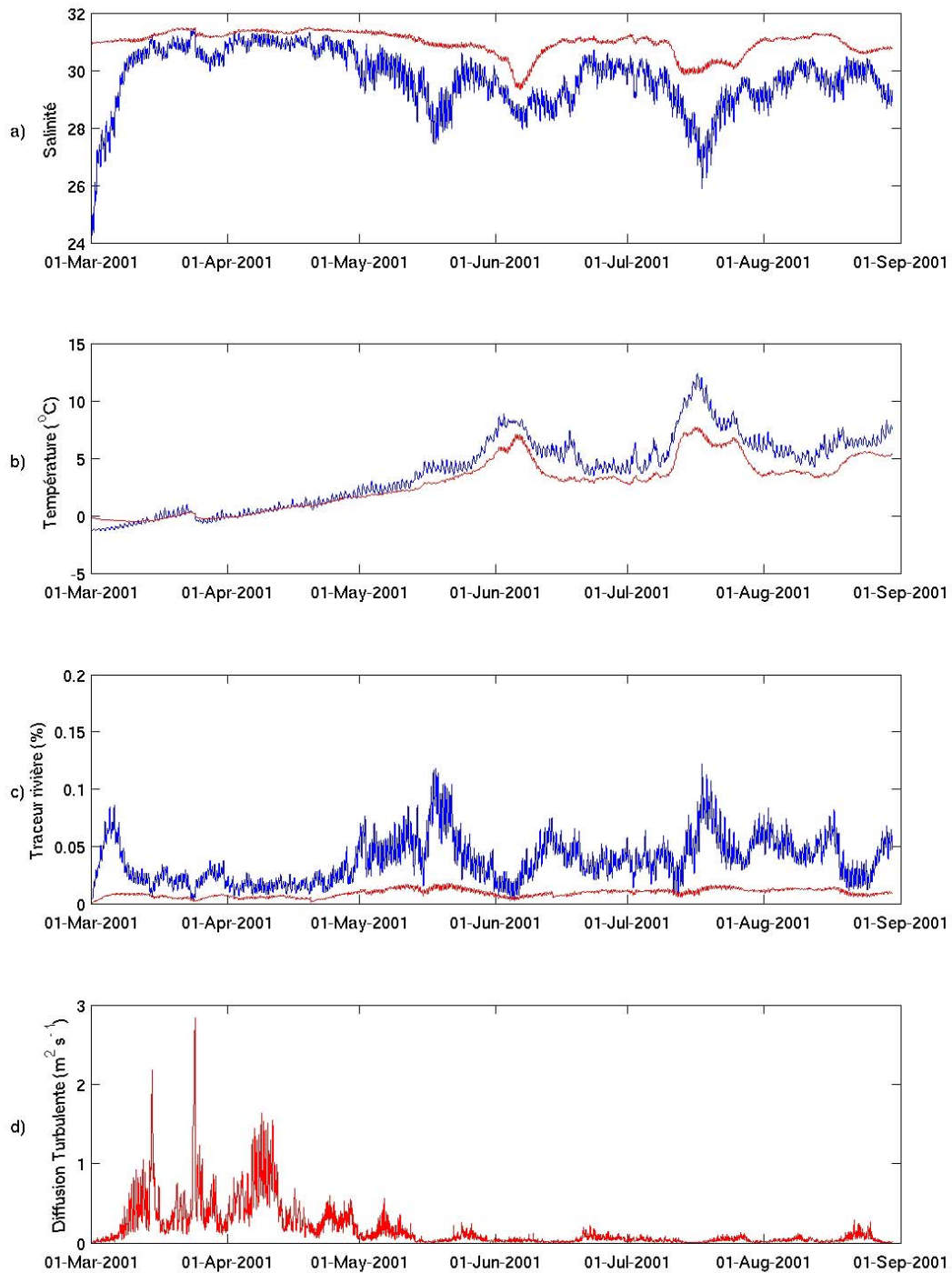


Figure 17: Série temporelle horaire de la solution HD montrant les moyennes sur la couche de surface (0-3m) (bleu) et sur l'ensemble du volume d'eau de HD (rouge) pour le scénario modifié (voir Fig. 4 pour le scénario naturel). (a) Salinité ; (b) Température en °C ; (c) marqueur des eaux de la rivière Romaine ; (d) coefficient de diffusion turbulente verticale.

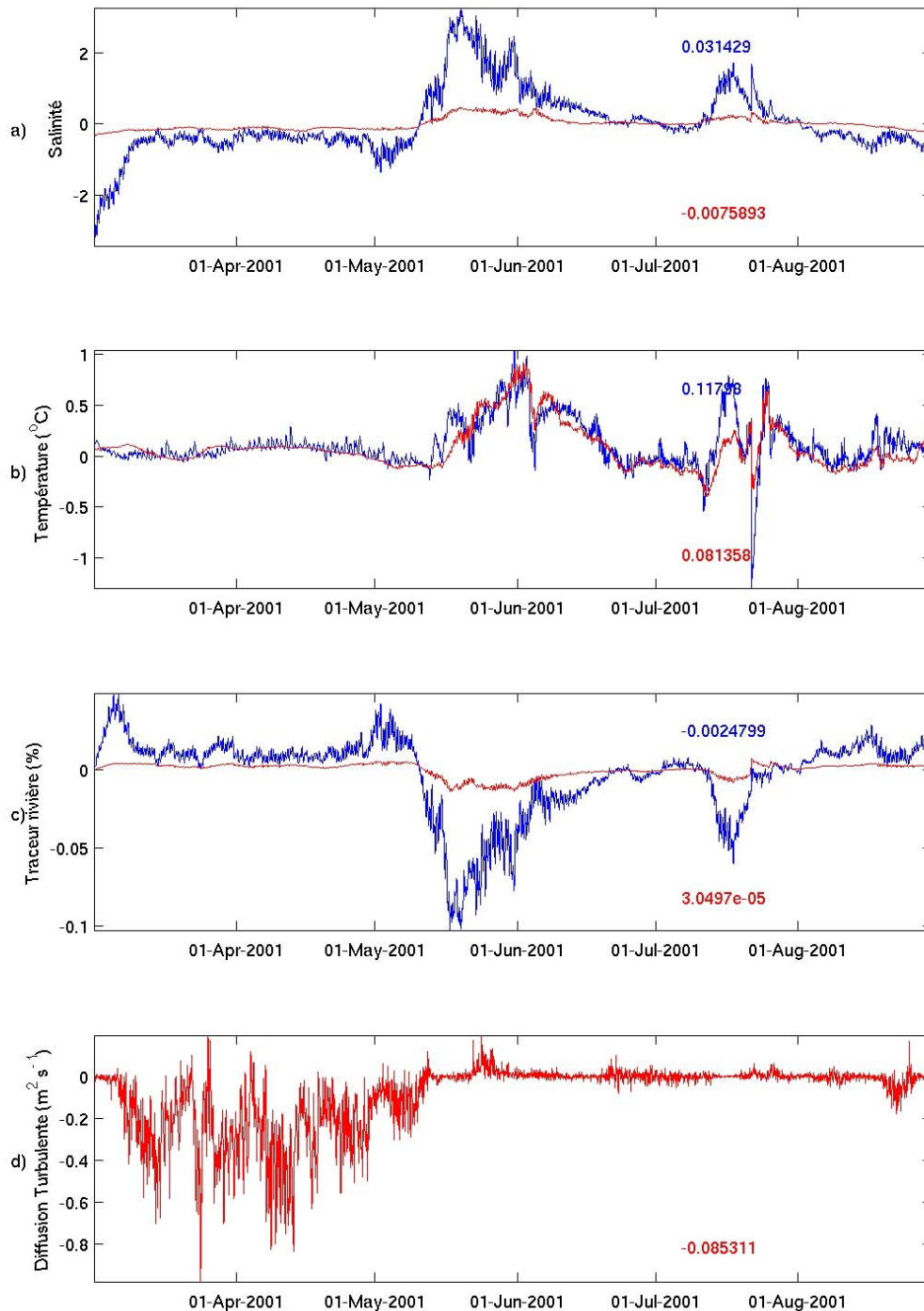


Figure 18: Différences induites par la modification du débit de la rivière Romaine (on soustrait les résultats de la solution HD-NAT de la solution HD-MOD, pour voir seulement les différences après aménagement). Séries temporelles horaires de la solution HD montrant les moyennes sur la couche de surface (bleu) et de l'ensemble du volume d'eau de HD (rouge). (a) Salinité ; (b) Température en °C ; (c) marqueur des eaux de la rivière Romaine ; (d) coefficient de diffusion turbulente verticale.

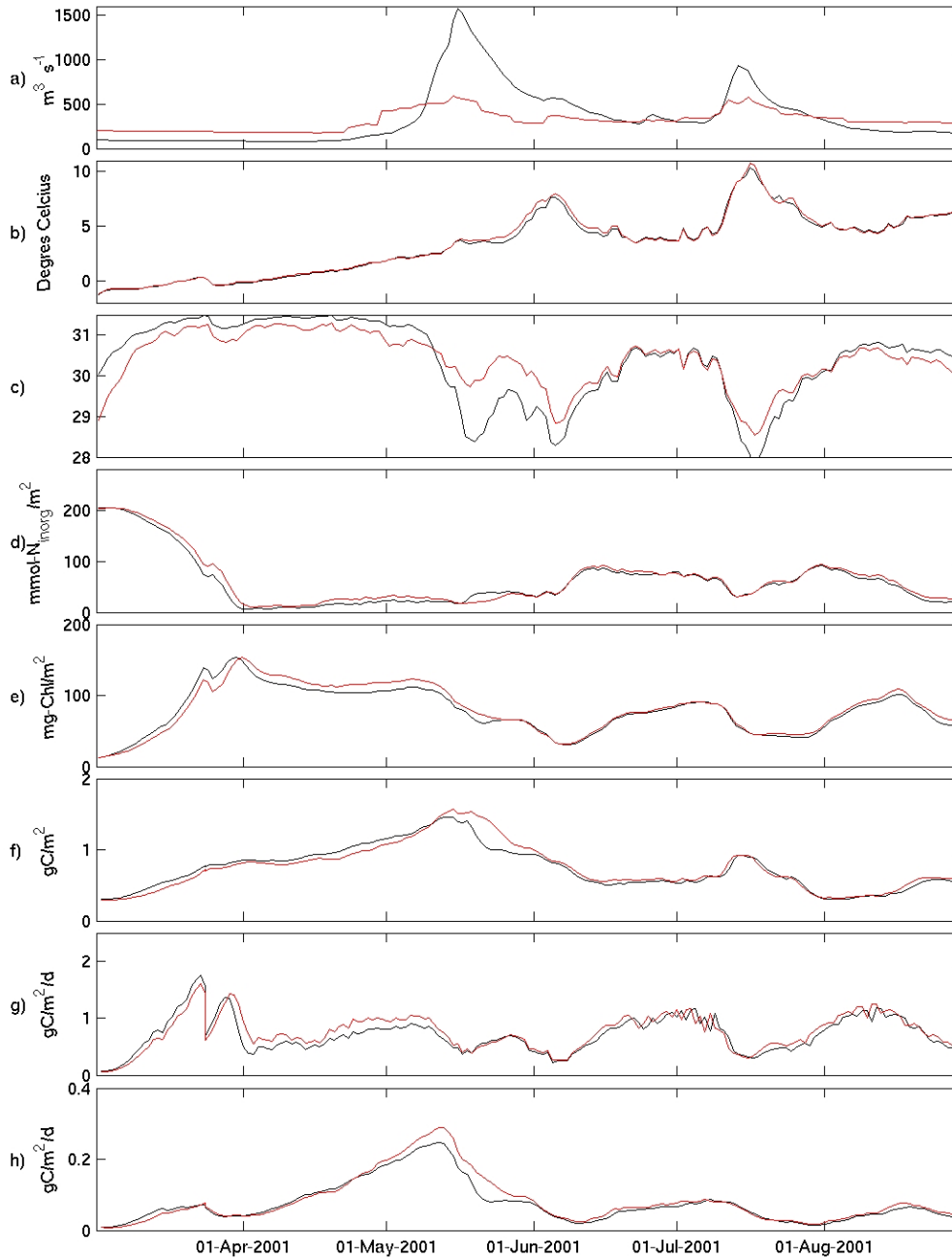


Figure 19: Résultats biologiques pour les simulations HD naturelles (courbes noires) et modifiées (courbes rouges). (a) Série temporelle journalière du débit de la rivière Romaine. Séries temporelles journalières moyennées dans l'horizontale sur le sous-domaine du chenal de Mingan pour la couche de surface (0-3m) : (b) Température °C ; (c) Salinité. Séries temporelles moyennées sur l'horizontale et intégrées sur la verticale entre la surface et 40 m de profondeur : (d) concentration des sels nutritifs ; (e) chlorophylle ; (f) biomasse de zooplancton ; (g) production primaire ; (h) production secondaire.

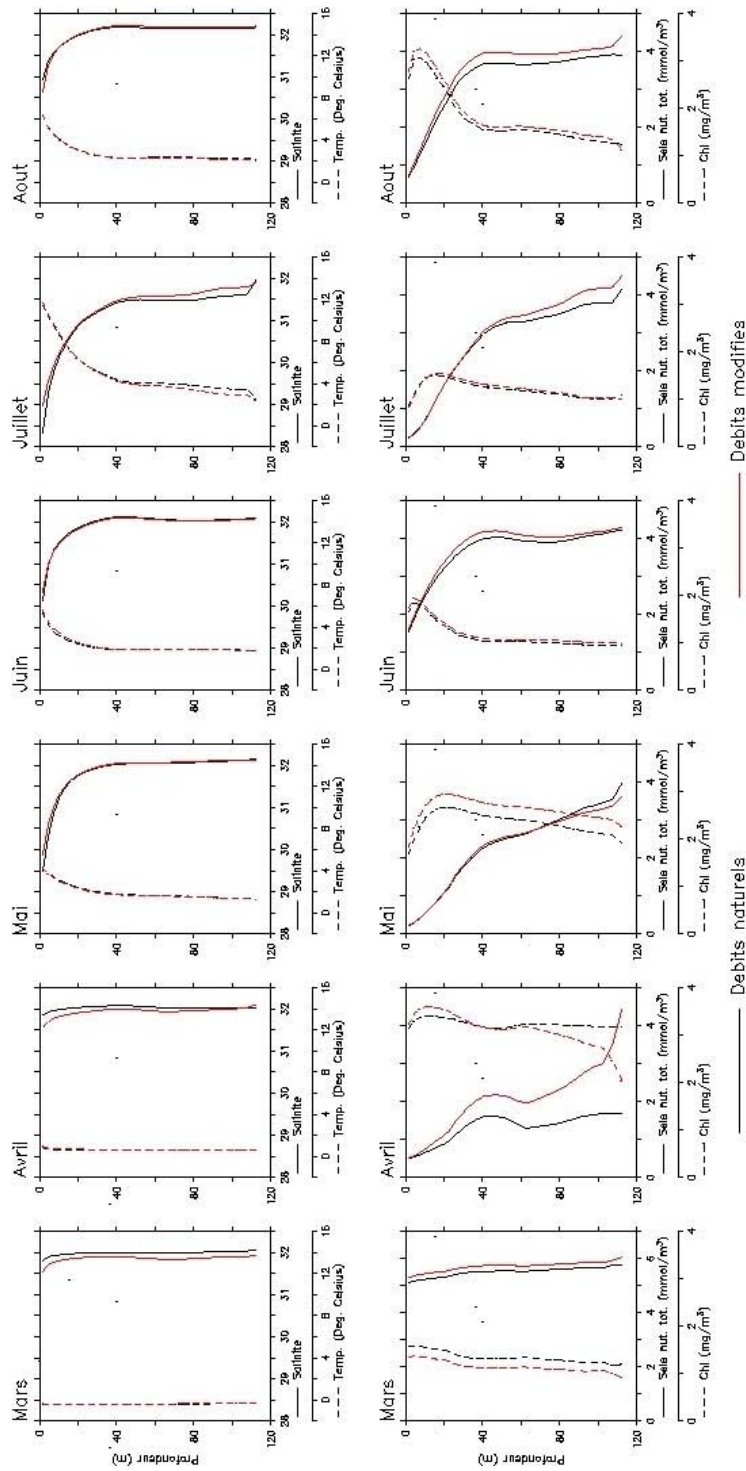


Figure 20: Comparaison entre les simulations HD-NAT (courbes noires) et HD-MOD (courbes rouges) des profils verticaux moyennés horizontalement dans le chenal de Mingan de la température, la salinité, les sels nutritifs totaux (NO₃+NH₄) et la chlorophylle au 15 de chaque mois (moyenne journalière).

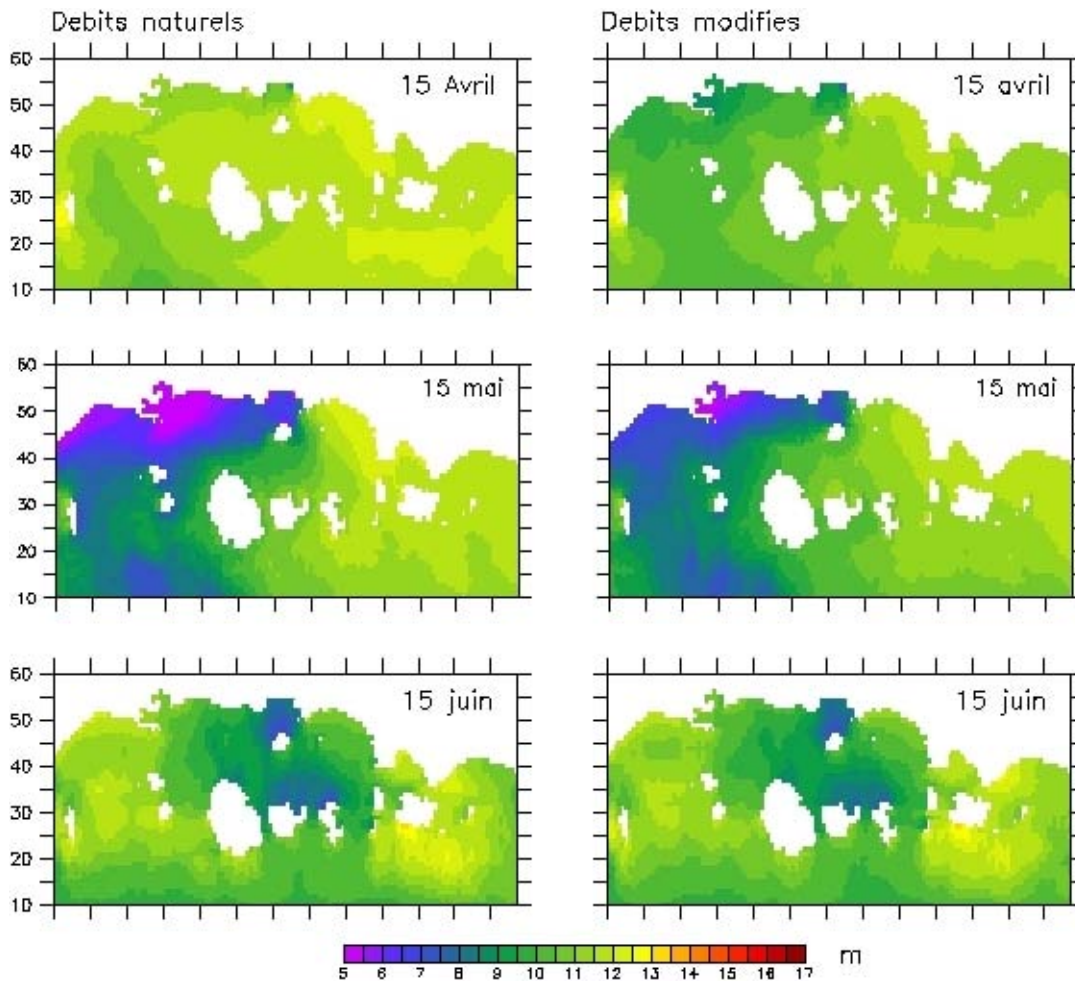


Figure 21: Profondeurs simulées de la couche euphotique avant (15 avril), pendant (15 mai) et après (15 juin) la crue de printemps pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite). La couche euphotique est définie selon la profondeur ou l'éclairement est réduit à 1% de l'éclairement incident à la surface. Elle détermine la zone dans laquelle il y a suffisamment de lumière pour la photosynthèse.

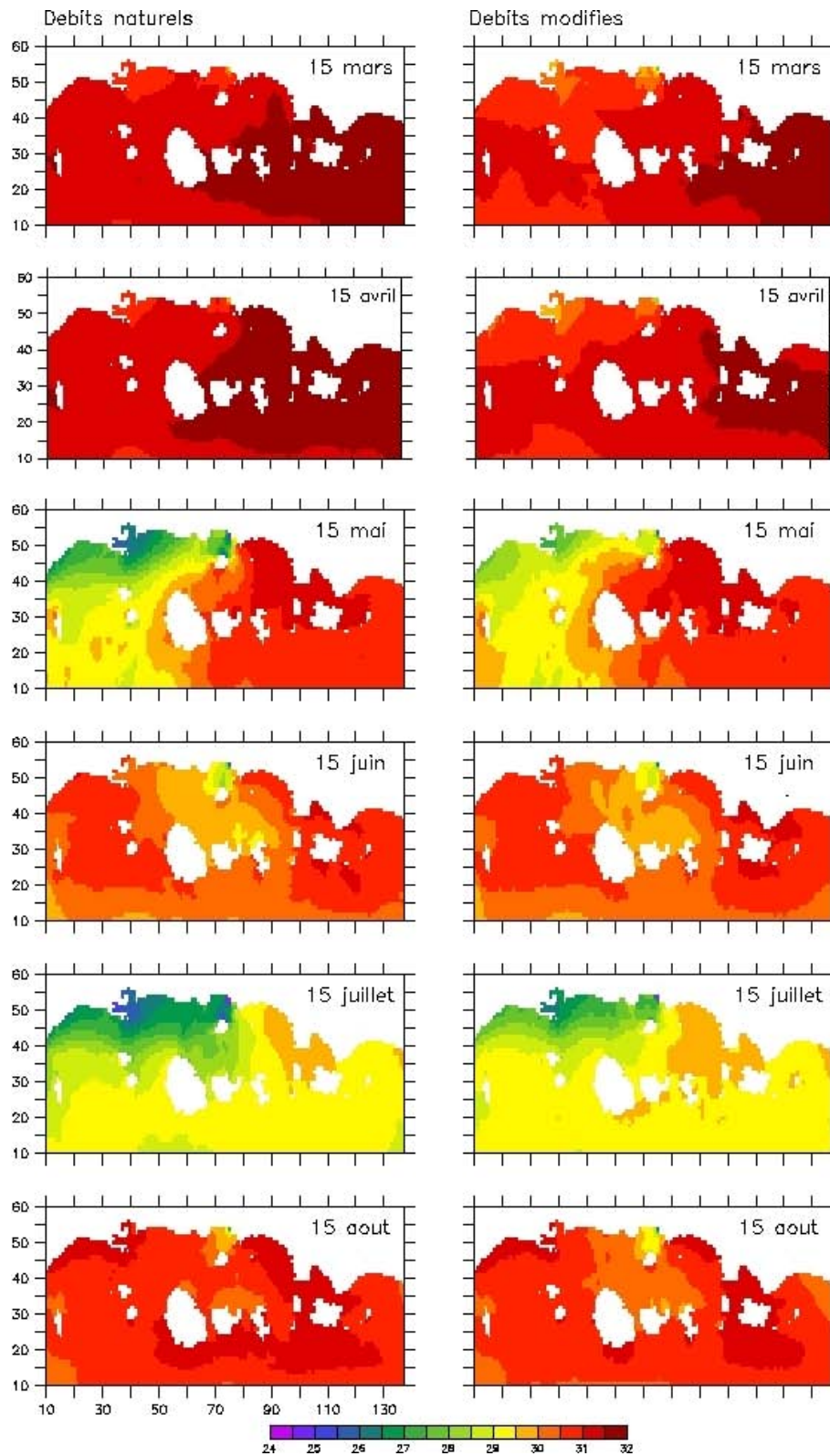


Figure 22: Salinité moyennée sur les dix premiers m de surface simulée au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

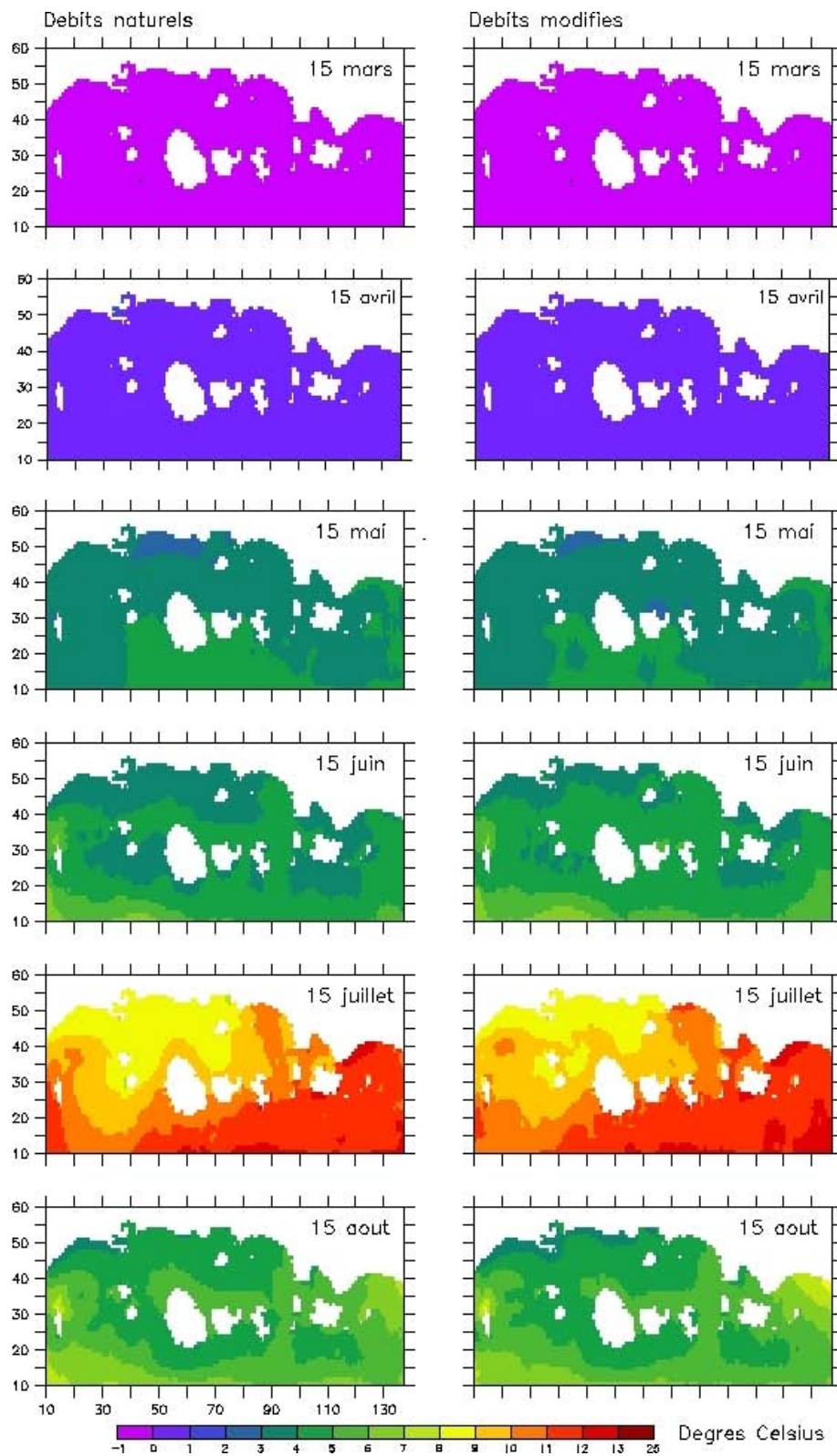


Figure 23: Température (en °C) moyennée sur les dix premiers m de surface simulée au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

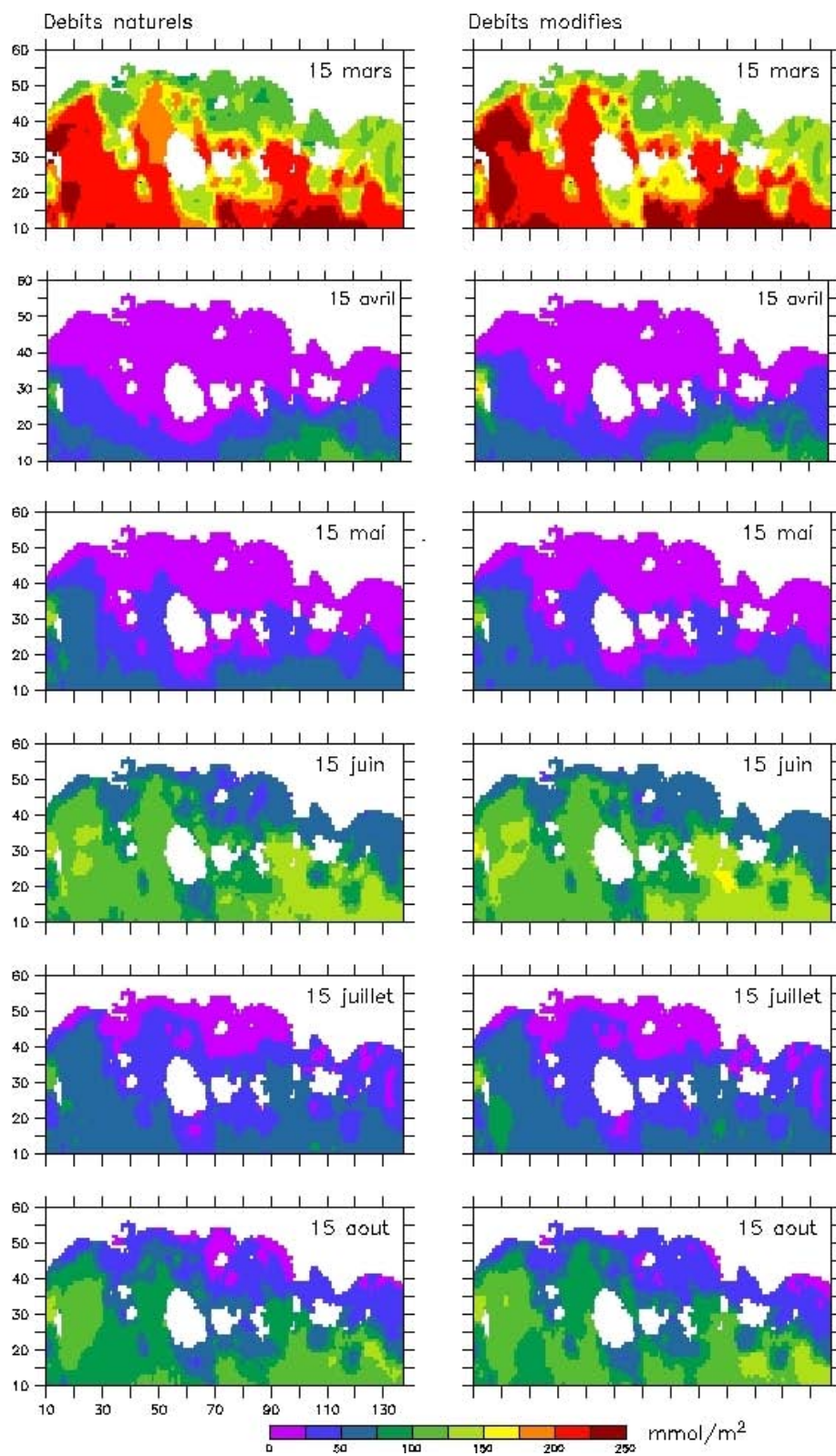


Figure 24: Sels nutritifs (NO_3+NH_4) intégrés sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

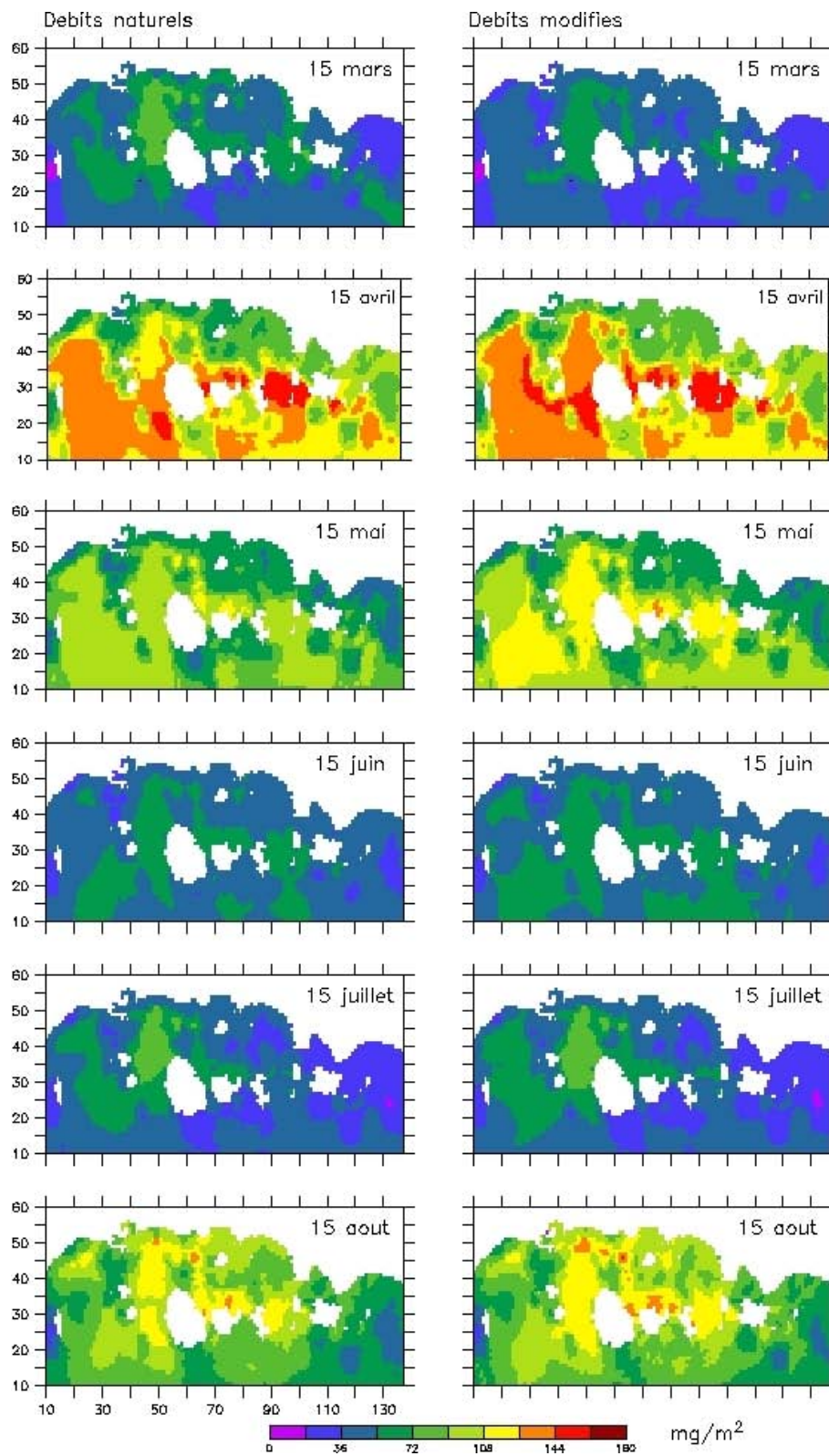


Figure 25: Chlorophylle intégrée sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

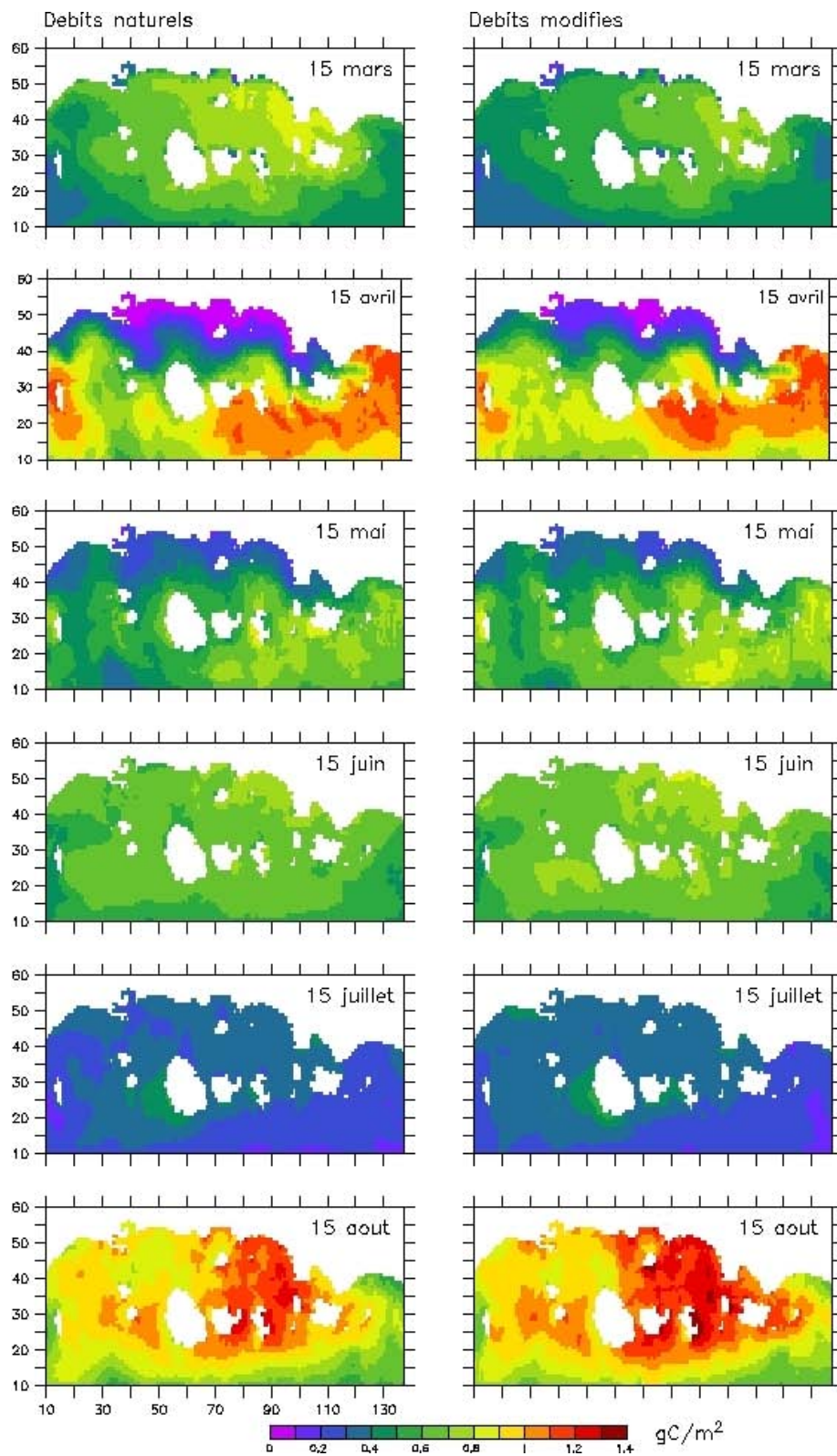


Figure 26: Production primaire intégrée sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

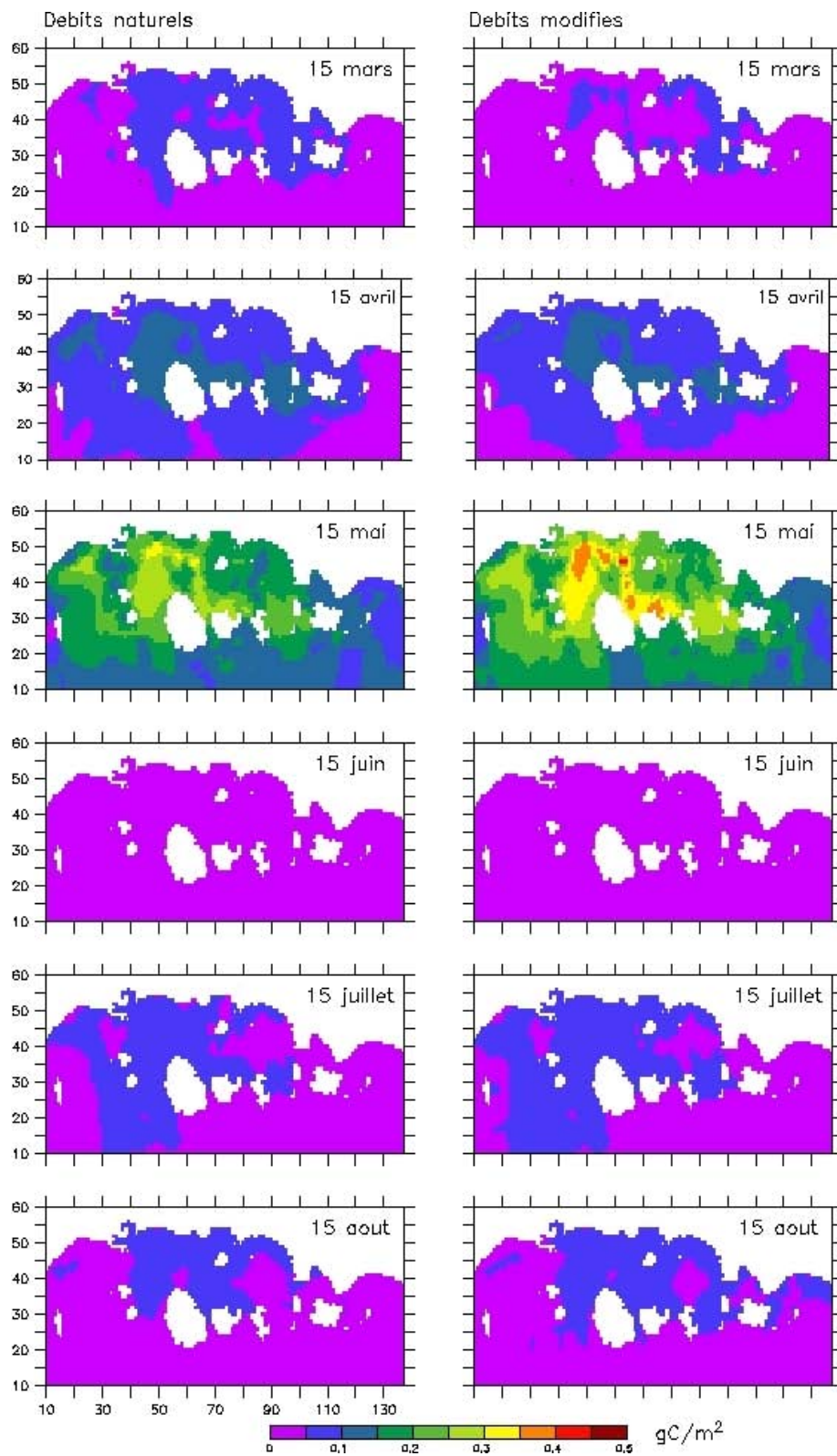


Figure 27: Production secondaire intégrée sur les 40 premiers m de surface au 15 de chaque mois pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

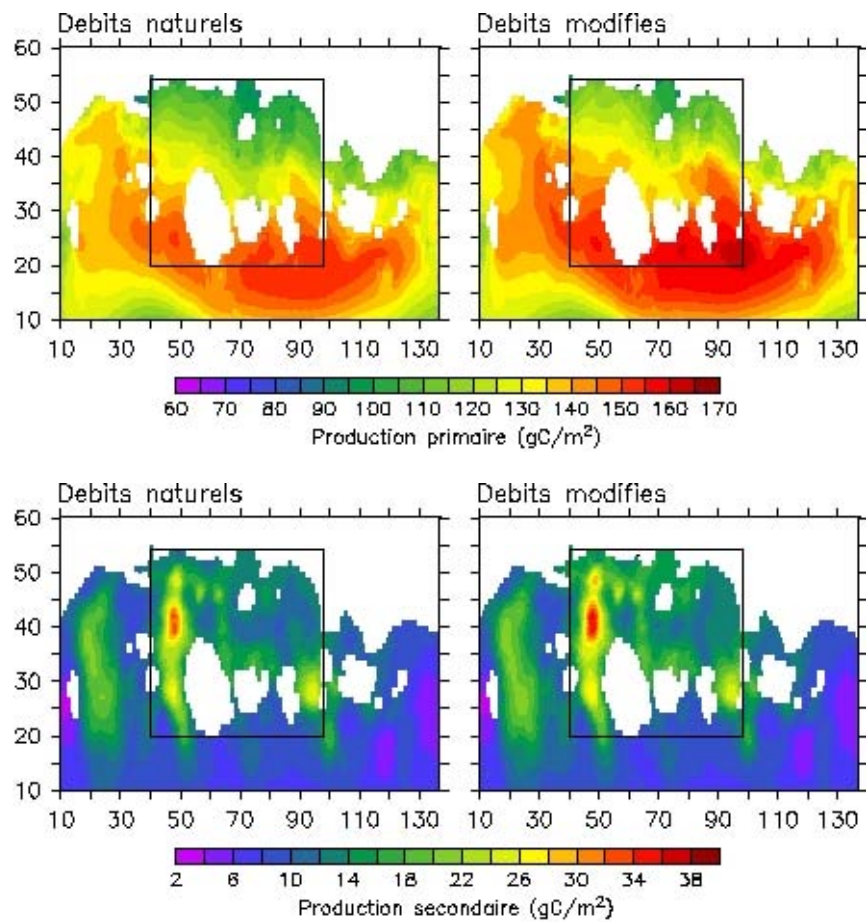


Figure 28: Production primaire (haut) et secondaire (bas) intégrées sur toute la profondeur de la colonne d'eau et dans le temps (1 mars-31 août 2001) pour les deux scénarios HD-NAT (colonne de gauche) et HD-MOD (colonne de droite).

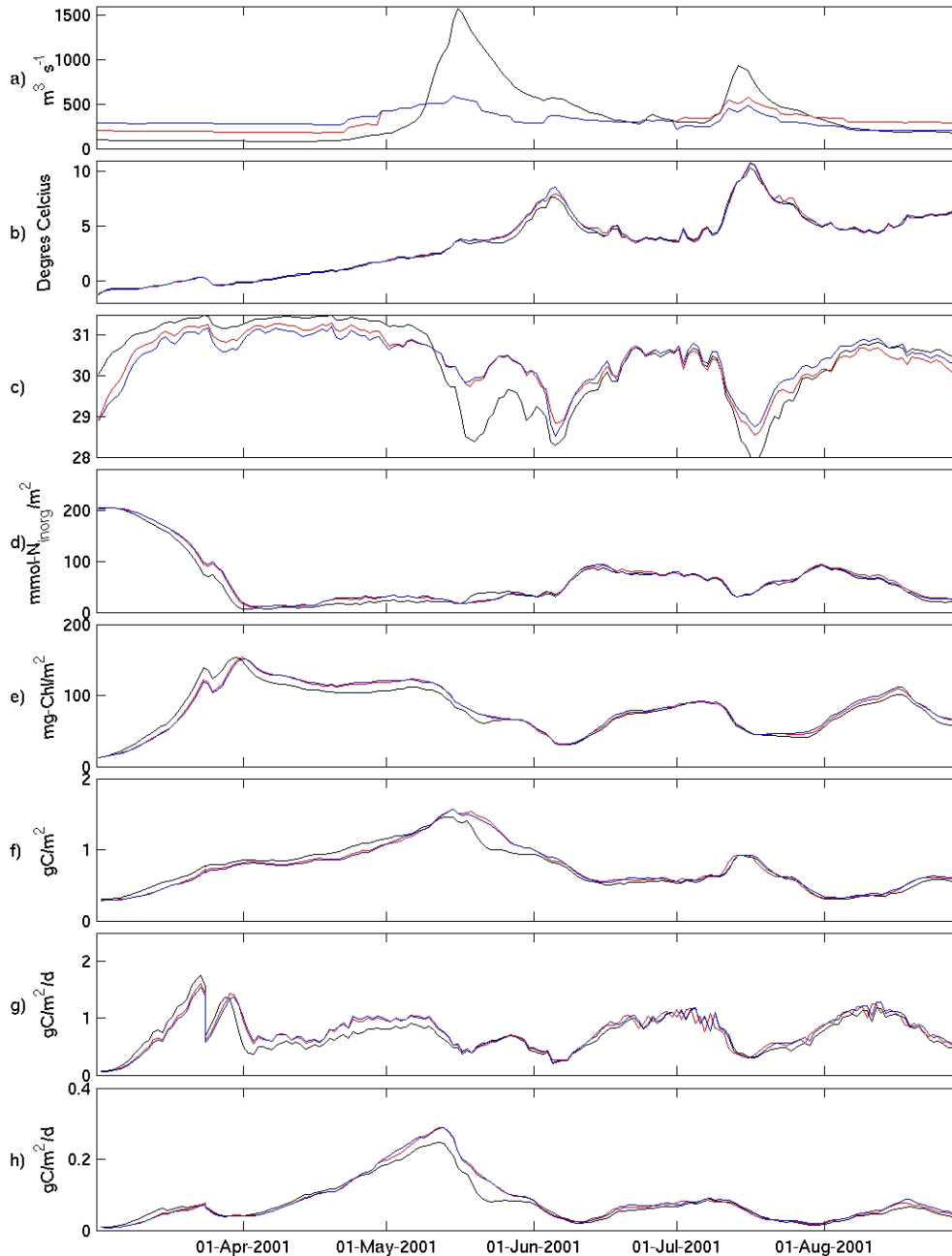


Figure 29: Résultats biologiques pour les simulations HD naturelles (trait noir), modifiées (trait rouge) et fortement modifiées (trait bleu). (a) Série temporelle journalière du débit de la rivière Romaine. Séries temporelles journalières moyennées dans l'horizontale sur le sous-domaine du chenal de Mingan pour la couche de surface: (b) Température en °C ; (c) Salinité. Séries temporelles moyennées sur l'horizontale et intégrées sur la verticale entre la surface et 40m de profondeur: (d) concentration des sels nutritifs ; (e) chlorophylle ; (f) biomasse de zooplancton; (g) production primaire; (h) production secondaire. Le trait rouge est continu, s'il semble interrompu, c'est que le trait bleu lui est superposé.