

OBSERVATOIRE « HOMMES-MILIEUX »
Littoral méditerranéen



Apport-GAM

*Apports de contaminants d'origine anthropique à la zone côtière du golfe
d'Aigues-Mortes : état actuel et prospectif*

Rapport d'étape

20 mars 2015

Responsable scientifique

Christian SALLES

Laboratoire HydroSciences Montpellier – UMR 5569
christian.salles@um2.fr

Sommaire

Sommaire	2
Résumé succinct du projet	3
Informations générales concernant le projet.....	4
1. Contexte problématique	5
2. Méthodologie	5
2.1 Terrains étudiés.....	5
2.2 Données.....	7
3. Résultats	9
3.1 Concentrations aux exutoires des unités hydrologiques	9
a. Paramètres physico-chimiques.....	12
b. Matières en suspensions	13
c. Bactéries témoins de contamination fécale	13
d. Eléments traces	13
e. Anomalie de Gadolinium	13
f. Les composés organostanniques	13
3.2 Modélisation statistique des flux de contaminants bactériens	15
4. Discussion	17
4.1 Variabilité inter-annuelle des flux bactériens	17
4.2 Flux prospectifs dans des conditions de changements climatiques	17
5. Conclusions et perspectives	18
Bibliographie citée.....	20

Résumé succinct du projet

Le projet propose d'établir et valider un modèle statistique pour caractériser les apports de bactéries d'intérêt sanitaire du bassin versant au golfe d'Aigues-Mortes. Le modèle repose sur les typologies des situations hydrométéorologiques et des critères pertinents liés à l'homme et à ses activités et notamment à l'urbanisation. Le modèle est dans un premier temps appliqué pour caractériser l'état actuel des apports de contaminants. Puis, à partir de scénarios d'évolution prévisible des indicateurs des changements locaux du fait de l'urbanisation et de la typologie des précipitations du fait des changements globaux, il sera utilisé pour réaliser des estimations des apports futurs, assorties d'une évaluation de l'incertitude sur ces estimations. Ce rapport d'étape présente la première phase de la modélisation où seules les caractéristiques hydrométéorologiques et leur évolution prévisible sont considérées. Pour la poursuite du projet, des indicateurs de pressions anthropiques sur la base des pratiques et des usages des sols et de l'eau sont proposés. Ces indicateurs rendent compte d'emprises au sol, de densité, de concentrations et de volumes. Ces indicateurs sont liés directement à la contamination (volumes de rejet) ou indirectement (densité de population, pourcentage de surfaces imperméabilisées...).

Dans la phase exploratoire d'une généralisation du modèle à d'autres contaminants, des campagnes d'acquisition de données aux exutoires du bassin versant du golfe d'Aigues-Mortes ont été réalisées et sont présentées.

Mots clés : bassin versant ; contaminants anthropiques ; changement climatique ; urbanisation ; modèle statistique

Informations générales concernant le projet

Responsable(s) scientifique(s)

Christian SALLES, MCF, Université de Montpellier (UM)
UMR 5569 CNRS IRD UM – HydroSciences Montpellier (HSM)
Université de Montpellier ; case 057 ; F-34095 Montpellier Cedex 5
33(0)4 67 14 42 69
christian.salles@um2.fr

Participants :

Nom-Prénom	Fonctions et laboratoire	Spécialité
BANCON-MONTIGNY Chrystelle	MCF - Université de Montpellier, UMR 5569- HSM (HydroSciences Montpellier)	Qualité des eaux, composés Organo-Métalliques
DELPOUX Sophie	AI – CNRS, UMR 5569- HSM (HydroSciences Montpellier)	Analyses, éléments traces
MARCHAND Pierre	IE – IRD, UMR 5569- HSM (HydroSciences Montpellier)	Hydrométrie
PERRIN Jean-Louis	CR – IRD, UMR 5569- HSM (HydroSciences Montpellier)	Hydrologie
RODIER Claire	IE – CNRS, UMR 5569- HSM (HydroSciences Montpellier)	Hydrométrie, base de données
TOURNOUD Marie-George	PR – Université de Montpellier, UMR 5569- HSM (HydroSciences Montpellier)	Hydrologie, qualité des eaux
MONFORT Patrick	DR – CNRS, UMR 5119- ECOSYM (Ecologie des Systèmes Marins Côtiers)	Qualité des eaux, Microbiologie
MOSSER Thomas	AI – CNRS, UMR 5119- ECOSYM (Ecologie des Systèmes Marins Côtiers)	Qualité des eaux, analyses
CERNESSON Flavie	MCF - AgroParisTech, UMR TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale)	Analyses spatiales

Dans le cadre de ce projet trois stagiaires ont été impliqués :

Efrain ALAS MORAN, Modélisation statistique des apports bactériens vers le Golfe d'Aigues Mortes *stage de Master1* "Eau et Ressource, spécialité HyDRE, Université Montpellier 2 (14/04/14 – 13/07/14)

Ariane FOURNAISON, Atlas de pressions polluantes potentielles pour la bande littorale du Golfe d'Aigues-Mortes, *stage élève Ingénieur*, Polytech Paris-UPMC (16/06/14 – 18/07/14)

Cathy SAUVAIRE, Inventaire des activités anthropiques littorales et flux de contaminants au Golfe d'Aigues Mortes, *stage élève ingénieur*, Polytech Montpellier (23/06/14 – 27/07/14)

Temporalité

Date de début des travaux : 15 février 2014

Date de fin des travaux pour la rédaction du rapport : 15 février 2015

Poursuite de l'étude en cours : Oui

Demande de soutien financier à l'OHM pour l'année 2015 : Sur un projet complémentaire

1. Contexte problématique

Depuis les années 1960 le littoral du Golfe d'Aigues-Mortes (GAM) est devenu un espace fortement attractif et aménagé. Le littoral a vu surgir d'ambitueuses entités balnéaires et plaisancières créant ainsi une forte dynamique touristique qui entraîne une forte augmentation de la population durant les trois mois de la période estivale, augmentation qui peut atteindre 40% sur certaines communes littorales. Le développement et l'attractivité des deux métropoles, Montpellier à l'ouest et Nîmes à l'est, ont entraîné une augmentation importante de la pression anthropique du bassin versant sur un environnement littoral extrêmement fragile. Les pressions anthropiques génératrices des contaminants sont en continuelle évolution du fait du développement des entités urbaines, de l'augmentation de la population et des mutations des activités humaines.

Les activités humaines des zones urbaines et périurbaines génèrent un large panel de contaminants, parmi lesquels on trouve des microorganismes souvent pathogènes, des résidus médicamenteux et des éléments traces classés par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau comme des substances dites prioritaires, car la plupart sont extrêmement dommageables pour la bonne qualité écologique des milieux récepteurs. Ces contaminants d'origine anthropique sont transférés depuis leurs sources par les réseaux de collecte et, après avoir traversé ou non des dispositifs de remédiation (station d'épuration), sont rejetés dans les rivières et rejoignent les milieux aval et la mer.

En région côtière méditerranéenne, le transfert des contaminants va être largement influencé par le régime des cours d'eau caractérisé par l'alternance de courts et intenses événements de crues et de longues périodes d'étiage, pouvant entraîner l'assèchement partiel ou total de leur lit. Le comportement hydrologique de ces hydrosystèmes intermittents est en continuelle mutation du fait de changements locaux rapides liés aux activités humaines (diminution des zones naturelles et agricoles au profit du développement urbain et touristique) et de changements climatiques affectant le régime des précipitations.

La bonne qualité des milieux aquatiques de la zone littorale, au sens de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, est un enjeu important pour les multiples usages de ces zones et reste une des premières préoccupations des gestionnaires des eaux littorales. Dans ce contexte nous abordons plusieurs questions : Comment évaluer les apports de contaminants liés aux activités anthropiques vers la zone côtière aval ? Quelle sera l'évolution des apports dans un contexte d'urbanisation rapide et de changement climatique ? Quels outils peuvent-être développés pour caractériser et suivre l'impact des apports sur le milieu aval ?

Ce projet vise à quantifier les apports de contaminants d'origine urbaine et péri-urbaine du bassin versant du GAM, du fait des ruissellements, des rejets directs dans les rivières et/ou lagunes littorales, des graus et des ports, ainsi que du rejet direct en mer. Les apports journaliers sont évalués à partir d'observations des flux aux exutoires des unités hydrologiques du bassin. Une analyse statistique associant les flux mesurés avec des indicateurs de l'occupation du sol et de la population des unités hydrologiques et des indicateurs des conditions hydrométéorologiques permettra de proposer un modèle des apports du bassin versant aux zones littorales. Le modèle est appliqué pour caractériser l'état actuel des apports de contaminants. Puis, à partir de scénarios d'évolution prévisible des indicateurs des changements locaux du fait de l'urbanisation et, de la typologie des précipitations du fait des changements globaux, il sera utilisé pour réaliser des estimations des apports futurs, assorties d'une évaluation de l'incertitude sur ces estimations.

2. Méthodologie

2.1 Terrains étudiés

Le Golfe d'Aigues-Mortes (GAM) est un espace maritime compris entre la Pointe de l'Espiguette et le Cap de Sète, bordant un linéaire terrestre côtier de plus d'une vingtaine de kilomètres qui fait face à une large plateforme continentale peu profonde. Géographiquement, le bassin versant du Golfe d'Aigues-Mortes est limité par le bassin versant du fleuve Hérault à l'Ouest, par celui du Rhône à l'Est et par les contreforts des Cévennes au Nord. Il couvre une superficie d'environ 2500 km². À l'exception de la partie nord-ouest, l'altitude dépasse rarement 230 m. Le régime climatique est influencé à la fois par la mer Méditerranée et par le relief cévenol en particulier dans sa partie est. Sur le bassin du GAM, pendant la période 1994-2013, la pluie moyenne annuelle est 712 mm, elle varie de 500 mm (2013-14) à 1074 mm (1995-96). La répartition annuelle des précipitations est très contrastée, les précipitations maximales correspondent à la période automnale et au printemps. La population totale approche 900 000 habitants avec 193 communes parmi lesquelles 2 grandes

métropoles : les agglomérations de Montpellier et de Nîmes avec respectivement 410 000 et 230 000 habitants. Les territoires agricoles occupent environ 48% de la superficie. Près de 36 % de la surface du bassin versant sont couverts de forêts et de végétation arbustive ou herbacée naturelles. Les zones industrielles et commerciales, les zones portuaires et aéroportuaires ainsi que des réseaux routiers et ferroviaires représentent 13.5% de la surface. Le reste de la surface est occupé par les zones humides. Le réseau hydrographique est constitué de plusieurs fleuves côtiers dont certains prennent leur source dans le massif cévenol et traversent les lagunes côtières avant de se jeter en mer. Ces lagunes communiquent avec la mer par des canaux appelés «graus». Le canal du Rhône à Sète longe le littoral, traverse et met en communication les lagunes et croise les fleuves côtiers canalisés (canal du Lez à Palavas, canal du Vidourle et du Vistre au Grau du Roi).

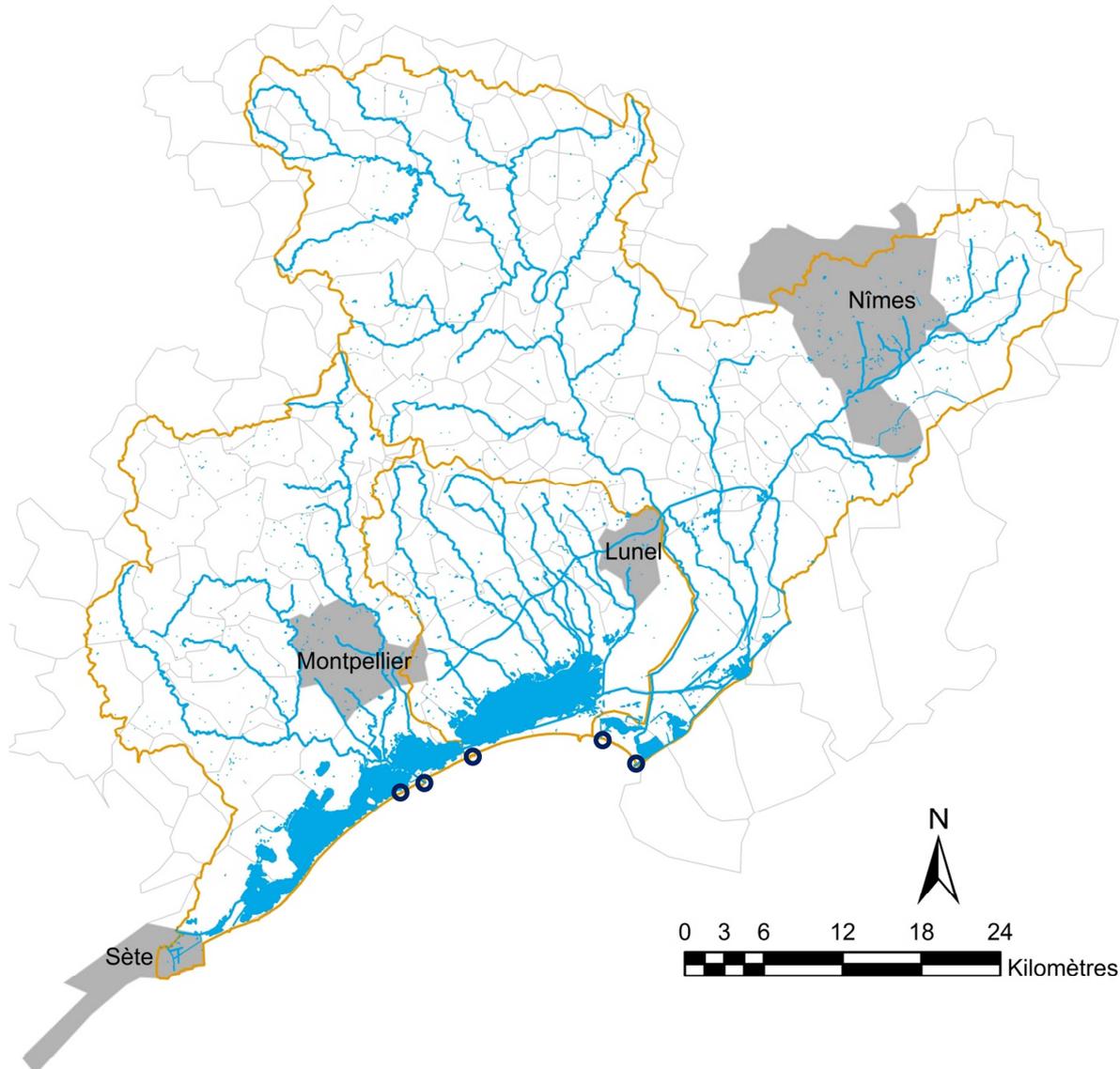


Figure 1 : Vue globale du bassin versant du Golfe d'Aigues-Mortes, unités hydrologiques et leurs exutoires, réseau hydrographique, délimitation communales.

Les exutoires du bassin versant pris en compte pour la mesure et l'évaluation des apports du bassin au GAM sont le fleuve Lez à Palavas, le canal qui réunit le Vistre et une part des écoulements du Vidourle au Grau du Roi, le canal qui assure la liaison entre l'étang de l'Or et le port à Carnon et les graus de l'étang du Prevost et de l'étang du Ponant. Ces stations d'observation avaient été sélectionnées dans le cadre du programme MICROGAM (Monfort et al. 2012). A partir de ces cinq stations, trois unités hydrologiques du bassin versant du GAM sont considérés: le complexe hydrologique Lez-Mosson-Etang Palavasien (LMEP) (709 km², 691 ha/km²), le bassin versant de

l'étang de l'Or (EO) (405 km², 740 ha/km²) le bassin versant des fleuves Vistre et Vidourle (VV) (1389 km², 40 ha/km²).

Le complexe LMEP est constitué du Lez, fleuve côtier de 20 km qui prend sa source dans le karst nord-montpelliérain et traverse l'agglomération de Montpellier. En aval son cours se poursuit dans une large plaine alluviale et après la confluence avec son affluent principal, la Mosson, il traverse la zone des étangs Palavasiens avec lesquels il entretient des échanges hydrauliques. A l'Ouest de la zone d'étude, de part et d'autre du Canal du Rhône-à-Sète avec lequel ils communiquent, se trouvent les

étangs palavasiens. Ces huit étangs (Ingril nord et sud, Vic, Pierre-Blanche, Prévost, Arnel, Méjean-Pérols et Grec), s'étendent sur 25 km entre Frontignan et Carnon. Les exutoires du complexe LMEP sont le Lez à Palavas les Flots et le grau du Prévost. L'étang de l'Or (ou de Mauguio) est une vaste lagune de 3170 ha alimentée en eaux douces par les canaux pérennes de Lunel, de l'Or et par de nombreux petits cours d'eau qui drainent le couloir péri-urbain entre les métropoles de Montpellier et Nîmes. Sa communication avec la mer Méditerranée se fait par l'intermédiaire du canal de Carnon qui relie le sud-ouest de l'étang au port de Carnon en croisant le canal du Rhône-à-Sète. L'unité hydrologique VV rassemble le fleuve Vistre et le fleuve Vidourle. Le Vidourle prend sa source à 500 m d'altitude en bordure sud-est du Massif de l'Aigoual. Il se jette en mer par le chenal maritime du Grau du Roi et par celui du grau des Abîmes qui relie l'étang du Ponant à la mer. Le Vistre prend sa source au nord-est de Nîmes dans le domaine des Garrigues. À 3 km au sud du Cailar, le Vistre se divise en deux parties : le Vieux Vistre et le canal du Vistre qui débouchent en mer au Grau du Roi.

2.2 Données

Les données recueillies proviennent de campagnes spécifiques d'échantillonnage et de jaugeage conduites aux exutoires des unités hydrologiques du bassin versant du GAM, de données issues du programme MICROGAM (Monfort et al., 2012) et de données collectées auprès des services gestionnaires.

Au total 4 campagnes spécifiques réparties sur une année ont été réalisées en régime d'écoulement sortant : le 9 juillet 2014, le 24 septembre 2014, le 4 novembre 2014 et le 19 janvier 2015. Le débit instantané est mesuré à l'aide d'un ADCP de surface simultanément aux mesures physico-chimiques in-situ et aux prélèvements des échantillons. Les paramètres physico-chimiques mesurés in-situ sont pH, conductivité, salinité, température et oxygène dissous. Trois échantillons sont prélevés pour réaliser des analyses au laboratoire et déterminer la teneur en :

- matières en suspension (MES) et matières en suspension volatiles (MVS).
- éléments traces métalliques (ETM) et organo étains (O-Sn)
- bactéries témoins de contamination fécale (BTCF) telles que coliformes thermo-tolérants (CTT) et streptocoques fécaux (SF).

L'échantillon est prélevé dans la colonne d'eau au centre de la section à proximité de la surface à partir du pont au moyen d'une bouteille horizontale de prélèvement.

Pour l'échantillon destiné aux analyses de BTCF nous avons reproduit le protocole de prélèvement retenu par Monfort et al. (2012). La section d'écoulement est divisée en 8 compartiments, l'échantillon prélevé est un mélange en quantités égales d'échantillons ponctuels dans les 8 compartiments.

Pour la détermination des éléments traces, terres rares (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu) et des composés organostanniques (TBT, DBT et MBT), les échantillons sont prélevés à l'aide d'un préleveur Mercos (Hydro-Bios®). Les eaux ont été filtrées sur filtres Millipore PVDF et acidifiées avec HNO₃ (Merck Suprapur) directement sur le terrain, et conservés à 4°C jusqu'à analyse.

Pour la détermination du carbone organique dissous (COD) l'eau a été filtrée sur filtres GFF (0.45µm) puis acidifiée avec H₃PO₄ (Normapur, 85%, VWR®) puis stockée à 4°C jusqu'à l'analyse. Les paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, salinité, température et oxygène dissous) ont été déterminés sur le terrain à l'aide de sondes portables Hach®.

Ces campagnes spécifiques renseignent sur la concentration et les apports aux exutoires du bassin du GAM. Le réseau de contrôle et de surveillance (RCS) mis en place par l'Agence de l'eau RMC et les DREAL du bassin Rhône Méditerranée fournit une évaluation de la qualité des eaux de surface. Les observations aux stations RCS localisées sur le réseau hydrographique du bassin versant du GAM seront des éléments de comparaison avec les niveaux de concentrations observées aux exutoires.

Les apports en bactéries témoins de contaminations fécales pour différentes situations hydrométéorologiques issues des observations du programme MilCROGAM (Monfort et al., 2012) servent à l'élaboration du modèle statistique des apports du bassin versant. Les données de flux s'échelonnent sur la période 2008-2011. Ainsi les données disponibles sont le flux de contamination bactérienne moyen journalier associé à une incertitude de mesure. Le nombre d'observations est de 13, 12 et 15 pour respectivement l'unité hydrologique LMEP, EO et VV.

Les conditions hydrométéorologiques sont caractérisées à partir des séries pluviométriques obtenues auprès des services de Météo-France. Les pluies journalières proviennent des stations météorologiques 'Montpellier Fréjorgues' et 'Nîmes-Courbessac' pour la période allant du 1 janvier 1994 au 31 janvier 2015. Les chroniques journalières de débits aux stations de Pont Garigliano (Lez) et Gallargues-le-Montueux (Vidourle) sont issues de la banque HYDRO. Les hydrogrammes couvrent la période 1 septembre 2013 au 31 janvier 2015. Les chroniques des précipitations pour le siècle à venir sont extraites de la base de données Med-CORDEX (www.medcordex.eu). Ce sont les résultats des simulations du modèle régional de climat (MRC) ALADIN 5.2 de Météo-France (CNRM) pilotées par les projections climatiques du CNRM-CM5 basées sur le scénario d'émission de GES SRES RCP8.5 and RCP4.5 pour la période 1950-2100. Les pluies journalières avec une résolution spatiale de 12 km sont simulées sur la période 2006 à 2099.

Pour caractériser les pressions polluantes sur les unités hydrologiques, des informations spatialisées ont été collectées dans les bases de données INSEE et IGN. L'inventaire des bases de données permettant de construire les indicateurs conduit à sélectionner les données du recensement de la population (Insee), les données carroyées à 200m sur la population (Insee), les différents thèmes de la BD Topo © (IGN) et la BD Carthage © IGN, la cartographie de l'artificialisation des terres agricoles de la DRAF du Languedoc-Roussillon, ainsi que les données issues du portail de l'information sur l'assainissement communal du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Toutes les versions retenues correspondent aux années comprises entre 2009 et 2010 en cohérence avec les mesures hydrologiques.

2.3 Démarche de traitement et d'analyse

Les analyses sont réalisées au sein du laboratoire Ecosym pour *E. coli* (Coliformes thermotolérants) et les entérocoques intestinaux (streptocoques fécaux). Les teneurs exprimées en colonies formant unité (cfu) sont déterminées selon les normes ISO 9308-1 et ISO 7899-2 respectivement. 100, 10, 1 ml d'eau sont filtrés sur des membranes stériles de cellulose (porosité 0,45 µm). Les filtres sont déposés en duplicat sur des milieux de culture gélosés en boîtes de Pétri. Cent µL de dilutions au 1/10 sont étalés en duplicat sur des milieux de culture gélosés en boîtes de Pétri. Les milieux de culture sont la gélose lactosée au TTC et Tergitol, incubé 24h à 44,1°C, pour la quantification de *E. coli*, et le milieu de Slanetz, incubé à 37°C, 48h, pour la quantification des entérocoques intestinaux (Monfort, et al., 2012).

Les analyses de MES et MVS sont réalisées par le Laboratoire départemental vétérinaire (CG34) sur un échantillon de 2 litres selon la norme NF EN 872. L'eau est filtrée et le poids de matières retenues par le filtre est déterminé par une pesée différentielle après un séchage à 105 °C. La détermination des matières en suspension (MES) est un indicateur de pollution concernant la charge en matières solides. Les matières volatiles en suspension (MVS) correspondent à la partie des MES volatilisée après calcination des MES à 525 °C, elle représente la part de matière organique dans les matières en suspension.

Le Carbone Organique Dissous (COD) a été déterminé à l'aide un analyseur de carbone Shimadzu. La détermination des terres rares et des éléments traces est effectuée à l'aide d'un ICP-MS-Q, iCAP-Q (THERMO SCIENTIFIC). L'exactitude et la précision des méthodes ont été testées à l'aide d'échantillons d'eau de mer certifiées CASS-5 et 6-NASS certifié (Conseil canadien de la recherche nationale (NRC)). Les concentrations mesurées sont en accord avec les valeurs certifiées à ± 10 %. La spéciation des composés organostanniques à l'état de traces a été réalisée par une technique analytique couplée (GC/ICPMS-Focus/Thermo Q ICP-MS X Serie II -Grand Plateau Technique pour la Recherche-plateforme AETE). Les composés sont préalablement dérivés avec du tétraéthylborate de sodium puis préconcentrés sur une fibre SPME (microextraction sur phase solide) avant d'être désorbés thermiquement dans l'injecteur du chromatographe. Cette technique analytique est à la fois sélective et sensible permettant d'atteindre des limites de détection inférieures au ng(Sn)/L.

Un modèle statistique de régression établi le lien entre les conditions hydrométéorologiques et les mesures de flux de contaminants bactériens provenant de chacune des unités hydrologiques. Pour

décrire les conditions hydrométéorologiques nous avons considéré l'indice des précipitations antérieures (IPA) qui caractérise les conditions d'humidité antérieures des sols et la pluviométrie de la période précédant l'observation. L'indice sélectionné est celui proposé par Koehler et Linsley (1951). Cet indice est une somme pondérée des précipitations journalières tombées au cours d'une certaine durée antérieure au jour d'observation. La pondération est d'autant plus faible que la précipitation est ancienne. L'expression de l'indice est :

$$IPA = \sum_{i=1}^n P_i k^i \quad (1)$$

Où n définit la durée, c'est le nombre de jours antécédents considérés, P_i est la pluie du $i^{\text{ème}}$ jour antécédent et k est un facteur de récession inférieur à 1. Les paramètres n et k ont été calés tels que la corrélation entre IPA et flux aux exutoires soit optimum. Ce premier modèle est appliqué sur les chroniques de pluies anciennes et futures. La variabilité inter-annuelle et la distribution des apports au cours de l'année hydrologique sont discutées.

Les campagnes d'observations réalisées pendant l'année 2014 sont exploitées à titre de validation pour le modèle des flux de contaminants bactériens et à titre exploratoire pour les teneurs d'éléments traces métalliques et les composés organostanniques.

3. Résultats

3.1 Concentrations aux exutoires des unités hydrologiques

Entre février 2014 et février 2015, 4 campagnes de mesures ont été menées aux exutoires des unités hydrologiques du bassin versant du GAM. Le contexte hydrométéorologique est illustré sur les figures 2a-b. Les graphiques représentent les pluies journalières (mm) mesurées à la station de Montpellier-Fréjorgues et à la station de Nîmes-Courbessac et le débit (m^3/s) à la station du Lez et du Vidourle (Figure 2a et b). Les pictogrammes rouges reportés sur les hydrogrammes indiquent les journées des campagnes de mesures et prélèvements. Les deux années hydrologiques successives sont très contrastées, une année sèche avec un déficit de précipitation suivie d'une année marquée par des événements pluvieux très intenses. Sur la bassin du GAM, les précipitations mesurées entre sept 2013 et sept. 2014 sont faibles (500 mm) par rapport à la moyenne inter-annuelle (705 mm). La précipitation annuelle de 2013-14 correspond au minimum annuel observé sur le bassin versant du GAM depuis 1994. Début 2014, jusqu'au mois de septembre, le niveau des écoulements est très faible, les débits moyens mensuels sont très inférieurs en référence aux moyennes observées sur ces cours d'eau sur la période 1999-2010. Au contraire, durant l'automne 2014, quelques événements cévenols localisés et très intenses engendrent des crues de très fortes amplitudes. Sur la première moitié de l'année hydrologique 2014-15, dans l'intervalle sept. 2014 à jan. 2015, les précipitations à Montpellier et Nîmes sont respectivement 680 mm et 561 mm.

La campagne du 9 juillet a permis une caractérisation de la qualité et des flux en début de saison estivale après un printemps marqué par un fort déficit de précipitations. Le 24 septembre correspond au début de l'automne quelques jours après une première crue de très forte amplitude. Le 4 novembre 2014 est une période de moyennes eaux et enfin la campagne du 14 janvier 2015 correspond à la période hivernale. Les conditions d'écoulements aux exutoires influencés par la marée n'ont pas été toujours favorables à la collecte d'échantillons. A la date et heure des prélèvements, les écoulements étaient en régime entrant (de la mer vers le continent) pour certaines des stations. Le tableau 1 dresse un bilan des prélèvements réalisés au droit des cinq stations pour les 4 journées de campagne. Le grau de Carnon fait l'objet d'un fonctionnement spécifique. Un 'barrage anti-sel' géré par le syndicat mixte de l'étang de l'Or (Symbo) a été aménagé pour éviter l'intrusion massive d'eau salée par vent marin violent. Parmi les 4 journées de campagnes d'observation, 2 ont coïncidé avec des fermetures des portes anti sel. Par la suite les journées de campagne seront mentionnées par J1 à J4 selon la notation utilisée sur le Tableau 1

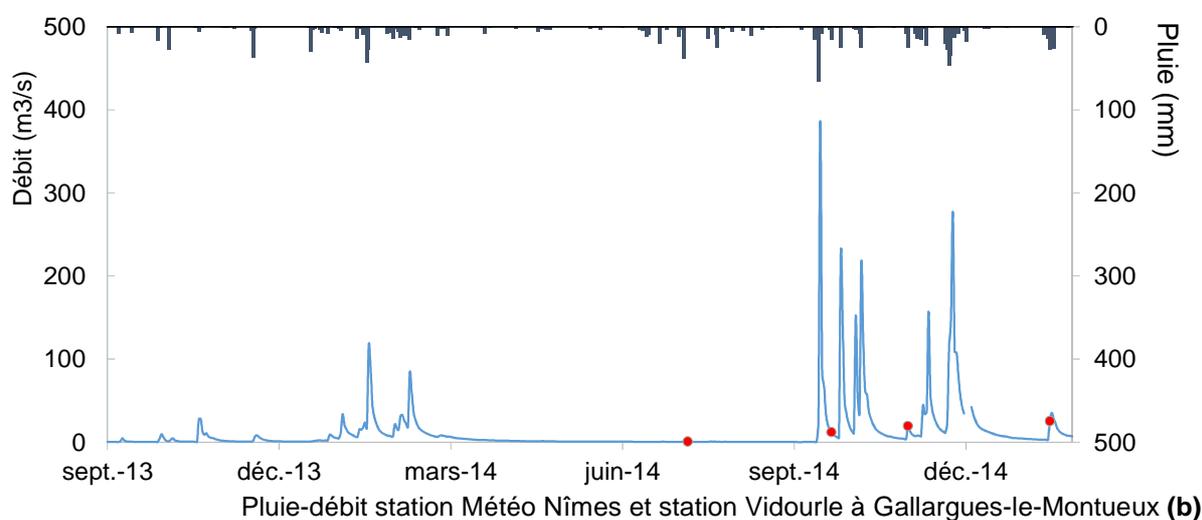
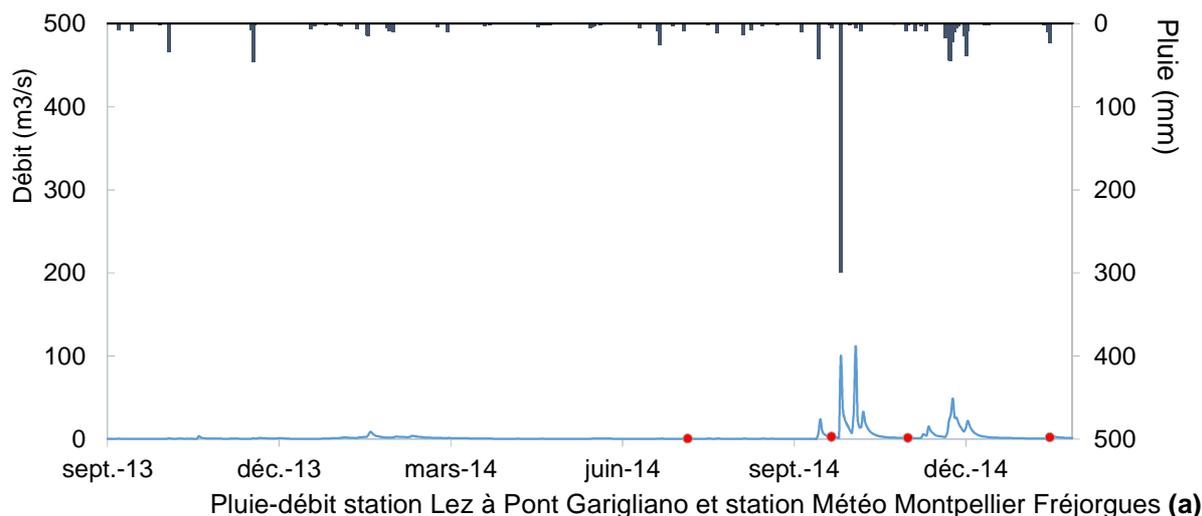


Figure 2 : Hydrogrammes et hyétoگرامmes représentatifs des conditions hydro-météorologiques sur les bassins versant du GAM. Les pictogrammes rouges reportés sur les hydrogrammes indiquent les journées de prélèvement.

Unité hydrol / Date	Lez-Mosson- EtangsPalavasiens LMEP	Etang de l'Or EO	Vistre-Vidourle VV	Nombre total de stations échantillonnées
J1 9 juil. 20114	Prélèvt et jaugeage: -Grau du Prevost -Lez à Palavas	régime rentrant	Prélèvt et jaugeage -Grau du Roi -Grau du Ponant	3
J2 24 sept. 2014	régime rentrant	porte anti-sel fermée	Prélèvt et jaugeage -Grau du Roi Régime rentrant -grau du Ponant	1
J3 4 nov. 2014	Prélèvt et jaugeage: -Grau du Prevost Régime rentrant -Lez à Palavas	porte anti-sel fermée	Prélèvt et jaugeage: -Grau du Roi -Grau du Ponant	3
J4 19 janv. 2015	Prélèvt et jaugeage: -Grau du Prevost Régime rentrant -Lez à Palavas	Prélèvt et jaugeage: -Canal de Carnon	Prélèvt et jaugeage: -Grau du Roi -Grau du Ponant	4

Tableau 1 : Bilan des prélèvements et jaugeages effectués les jours de campagne de mesure pour l'année 1

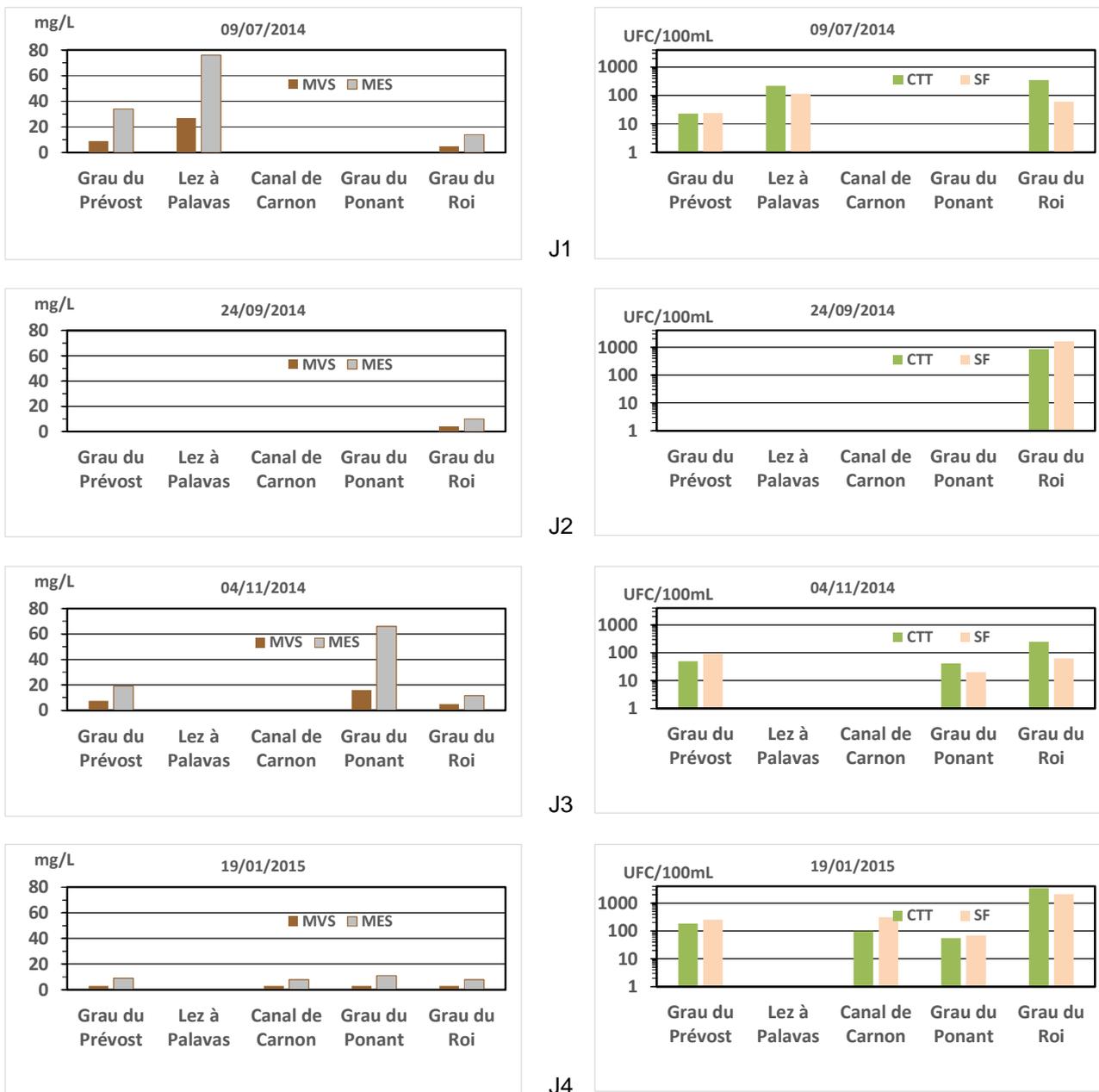
OHM « Littoral méditerranéen » - Rapport d'étape 2014

Station	Jour	Débit instantané (m3/s)	T (°C)	IPA (mm)	Conductivité (mS/cm)	salinité (‰)	pH	O2 (mg/L)	O2 (%)	COD (mg/L)	MES (mg/L)	MVS (mg/L)	CTT (ufc/100mL)	SF (ufc/100mL)
Grau du Prévost	J1	28.5	19.7	5.5	53.3	38.4	7.53	7.31	80.3	4.99	34	9	23	24
	J3	15.8	18.0	9.5	44.7	28.9	8	9.01	97.4	1.36	19	7.5	50	95
	J4	7.1	9.6	32.2	51.5	49.7	8.37	11.07	97.9	1.42	9	3	185	255
Lez à Palavas	J1	12.7	20.1	5.5	46.8	33.9	7.69	5.57	61.6	6.61	76	27	220	115
Grau de Carnon	J4	2.65	9.7	11.7	44	41.4	8.7	11.04	97.8	4.27	8	3	98	310
Grau du Ponant	J3	<0	18.5	31.0	43.5	28.1	8.03	9.91	105.8	1.54	66	16	41	20
	J4	30.1	8.5	42.8	31.7	29	8.52	11.75	101	2.65	11	3	55	70
Grau du Roi	J1	26.7	22.0	26.0	14.8	9	7.56	5.3	60.7	3.8	14	5	347	60
	J2	8.4	20.4	30.7	35.5	26	8.15	7.9	87.2	1.62	10	4	927	2250
	J3	61.5	18.3	31.0	40.2	25.7	7.87	8.35	91.1	2.46	11.5	5	250	62
	J4	21.4	10.2	42.8	41.5	38.3	8.2	10.53	93.9	5.41	8	3	3500	2100

Tableau 2 : Table synthétique des campagnes et des résultats d'analyses : paramètres hydro-météorologiques, paramètres physico-chimique, teneur en matières en suspension et BTCF.

a. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés lors des 4 campagnes de prélèvement sont reportés sur le Tableau 2. Les heures de prélèvement sont choisies pendant les plages horaires de basse mer prédéterminées avant la journée de campagne en se basant sur les prédictions du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Cependant, les résultats montrent que les échantillons prélevés présentent des salinités élevées (9 à 51.5 ‰). La teneur des eaux prélevées ne correspond pas à des eaux douces mais des mélanges eau de mer-eau douce voir dans certains cas des eaux de mer. Dans les conditions d'écoulement des journées d'échantillonnage les stations d'échantillonnages situées le plus à l'aval possible des unités hydrologiques pour englober l'ensemble des affluents se trouvent trop proches de la mer et rendent difficile le prélèvement d'un échantillon constitué uniquement d'eau douce.



(a)

(b)

Figure 3 : Concentrations observées en MES et MVS (a) et CTT et SF (b) aux exutoires du bassin du GAM pour les 4 journées de campagne de mesure

b. Matières en suspensions

Les teneurs en matières en suspension et matières volatiles sont indiquées Tableau 2 et illustrées Figure 3. Les teneurs en MES varient d'un facteur 10 entre 8 et 76 mg/L. La variabilité spatiale des niveaux de concentration est démontrée pour la journée de campagne J1 en début de période estivale et J3 pendant l'automne. Les niveaux de concentration pour la journée du 19 janvier 2015 sont similaires aux 4 exutoires échantillonnés. Cependant pour un exutoire fixé, la variabilité temporelle est moindre. Ce constat est à relier aux conditions de précipitations antérieures qui sont proches entre les 4 journées de campagnes. Les niveaux observés à la station du canal du Grau du Roi sont relativement stables pour les 4 journées. Sur cette station, la quantité de MVS représente de l'ordre de 40% des matières en suspension. Toutes journées et toutes stations confondues, le ratio moyen MVS/MES est 35%.

c. Bactéries témoins de contamination fécale

Les teneurs en bactéries témoin de contamination fécale (BTCF) sont reportées Figure 3b et Tableau 2. Les niveaux de CTT varient entre 23 et 3500 ufc CTT/100ml et SF entre 20 et 2100 ufc SF/100ml. La limite impérative de la directive cadre européenne (10^2 ufc CTT/100ml et 10^2 ufc SF/100ml) est toujours dépassée au canal du Grau du Roi pour les CTT. Le niveau moyen le plus élevé sur l'ensemble des 4 stations est observé la journée du 19 janvier 2015.

d. Eléments traces

Les teneurs en éléments traces métalliques des eaux échantillonnées aux exutoires du bassin versant du GAM sont reportées Tableau 3. En complément, à titre comparatif nous avons reporté les gammes des variations (minimum-maximum) des teneurs issues des suivis réalisés dans le courant de l'année 2014 aux 3 stations RCS situées sur le Lez, le Vidourle et le Vistre. Il s'agit des stations 'Lez à Prades-le-Lez 3' (code n° 06188785), 'Vidourle à Liouc (code n°06178023) et la station 'Vistre à Saint Laurent d'Aigouze (n° 06193700).

Les observations reportées aux exutoires ne permettent pas d'identifier les flux d'éléments traces métalliques en provenance du bassin versant d'Aigues-Mortes car les échantillons prélevés ne sont pas des eaux de surface mais un mélange eau de mer/ eau de surface. Différents processus peuvent en effet avoir lieu dans ces zones de transition. Si certains composés sont conservatifs, d'autres vont être remis en suspension ou à l'inverse adsorbés sur les particules en suspension. Sans mesures effectuées à l'amont sur les eaux douces et une valeur référence de la concentration des eaux du Golfe, il est impossible de conclure sur la provenance des flux et les niveaux de contaminations observés.

e. Anomalie de Gadolinium

Le gadolinium (Gd) fait partie du groupe des lanthanides ou terres rares et est présent à l'état de traces dans la nature. En raison de ses propriétés magnétiques, le Gd, complexé avec un ligand organique, est utilisé depuis le début des années 80 comme agent de contraste en Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Injecté au patient qui va subir une IRM, il est complètement excrété via le système urinaire dans les 24 heures qui suivent. Ce complexe très stable dans l'eau, n'est pas éliminé par les traitements appliqués dans les stations d'épuration et est donc rejeté dans l'environnement aquatique via les eaux usées. La présence de Gd d'origine anthropique dans l'environnement aquatique se manifeste par l'existence d'une anomalie positive de Gd visible sur le profil normalisé des 14 terres rares. Le Gd permet de tracer la présence ou la réutilisation d'eaux usées dans l'environnement aquatique. L'anomalie de Gd (Gd^*) calculée en effectuant le rapport entre la concentration mesurée normalisée de Gd et la concentration théorique normalisée est positive et significative dans les eaux quand elle est supérieure à 1.5. Une légère anomalie en Gd est observée sur les prélèvements du 04/07/14 (Grau du Roi, Palavas, Grau du Prévost). La présence de Gd anthropique dans les eaux de surfaces révèle une contamination par les eaux usées.

f. Les composés organostanniques

Les butylétains sont des composés d'origine anthropique. Le TBT a longtemps été utilisé dans les peintures antisalissure. Ces composés sont largement employés comme catalyseurs ou pour leur propriété antifongique. La présence des composés organostanniques est détectée sur les stations du Grau du Roi, du Lez à Palavas, et du grau du Prévost. Les composés organostanniques étant

plus ou moins bien éliminés dans les systèmes de traitement, les effluents des STEP sont des sources potentielles de contamination et pourraient être à l'origine de cette contamination. Cependant il n'est pas à exclure que la présence de TBT (et ses produits de dégradation DBT et MBT) soit liée au trafic de bateaux bien que l'utilisation des peintures au TBT soit prohibée. Les concentrations mesurées dans la fraction dissoute sont inférieures à la Norme de Qualité Environnementale-Concentration Maximale Admissible (NQE-CMA) proposée pour les eaux de surface par la Commission européenne de 0.61 ng(Sn)/L pour le TBT.

Station	Jour	As nmol.L ⁻¹	Cd nmol.L ⁻¹	Cu nmol.L ⁻¹	Fe nmol.L ⁻¹	Mn nmol.L ⁻¹	Ni nmol.L ⁻¹	Pb nmol.L ⁻¹	Zn nmol.L ⁻¹
Grau du Prevest	J1	35.87	0.09	10.89	109.16	188.46	23.42	0.25	13.99
	J3	26.41	0.1	4.93	23.95	71.14	9.43	0.17	27.76
	J4	21.01	0.05	8.14	33.59	56.93	9.54	0.18	23.83
Palavas	J1	25.12	0.13	17.69	191.07	228.81	15.16	0.38	18.09
Grau de Carnon	J4	21.04	0.05	24.82	93.73	110.82	13.41	0.21	36.93
Grau du Ponant	J3	25.18	0.11	5.08	28.51	43.71	10.31	0.36	45.57
	J4	20.44	0.13	15.33	81.71	238.47	17.37	0.2	51.51
Grau du Roi	J1	39.23	0.04	24.28	103.06	560.82	19.29	0.57	31.52
	J2	26.59	0.07	8.74	32.78	279.1	9.42	0.18	30.06
	J3	28.61	0.12	15.35	210.88	549.39	12.98	0.17	80.02
	J4	20.41	0.13	49.61	80.01	275.58	27.71	0.64	122.41
RCS Lez min – max		< 6.7	<0.09	2.0 – 5.5	53.8 – 80.6	10.9 – 20.0	< 8.5	< 0.25	< 15 – 17.3
RCS-Vistre min – max		10.7 – 24.0	<0.09	12.6 - 26.8	250.9 – 530.5	10.9 – 255.0	17.0 – 25.5	0.38 – 1.50	48.5 – 508.1
RCS-Vidourle min – max		12.0 – 24.0	<0.09 – 0.09	9.9 – 12.7	62.7 – 190.0	<9.1 – 27.3	< 8.5	<0.25 – 3.6	<15 – 26.3
Moyenne eaux de rivière*		22.7	0.09	23			8.5	0.15	

* d'après Martin and Windom (1990) et Elbaz-Poulichet et al. (1996)

Tableau 3 : Concentrations en éléments traces (nMol/l)

Station	Jour	MBT ng(Sn).L ⁻¹	DBT ng(Sn).L ⁻¹	TBT ng(Sn).L ⁻¹
Grau du Prevest	J1	0.1	0.12	n.d *
	J3	2.7	1.31	0.18
	J4		0.12	0.07
Palavas	J1	0.29	0.12	0.11
Grau de Carnon	J4	n.d *	n.d *	n.d *
Grau du Ponant	J3	n.d *	n.d *	n.d *
	J4	n.d *	n.d *	n.d *
Grau du Roi	J1	0.89	0.23	0.19
	J2	n.d *	n.d *	n.d *
	J3	n.d *	0.47	n.d *
	J4	0.2	1.25	0.58

* n.d: non détecté

Tableau 4: Concentrations en composés organostanniques (ng(Sn).L⁻¹)

3.2 Modélisation statistique des flux de contaminants bactériens

Les flux journaliers de bactéries témoins de contamination fécale observés aux exutoires du bassin du GAM provenant du projet MicroGAM sont considérés dans cette analyse statistique. La démarche consiste à déduire des observations le flux journalier à l'échelle de l'unité hydrologique LMEP, EO, et VV. La première étape consiste à produire un modèle statistique des flux pour chacune des unités hydrologiques. L'indice de précipitations antérieures (IPA) est la variable explicative quantifiable qui caractérise les conditions hydro-météorologiques de la période antérieure à la journée d'estimation du flux. Une régression linéaire simple entre flux journalier de BTCF et IPA est proposée.

Les observations ont été réalisées entre juin 2008 et mars 2011. Le jeu de données disponible contient 13 évaluations du flux journalier de l'unité hydrologique LMEP, 12 évaluations pour l'unité EO et 15 évaluations pour l'unité VV. L'indice des précipitations antérieures couvre une gamme entre 2 et 100 mm pour le pluviomètre de Montpellier (LMEP et EO) et entre 0.6 et 60 mm pour le pluviomètre de Nîmes (VV). La gamme de variation des flux de CTT est comprise entre $6 \cdot 10^{10}$ cfU_CTT/j et $1 \cdot 10^{17}$ cfU_CTT/j. Le niveau de flux moyen est équivalent pour les unités hydrologiques LMEP et VV (de l'ordre de $6 \cdot 10^{15}$ cfU_CTT/j) mais il est de deux ordres de grandeur inférieur pour l'unité EO (environ $5 \cdot 10^{13}$ cfU_CTT/j). Des modèles de régression linéaire simple entre le flux journalier de ufc_CTT exprimé en échelle logarithmique (valeur transformé en \log_{10}) et l'IPA sont représentés Figure 4. Les valeurs des paramètres n et k pour le calcul de l'IPA (cf. équation 1) sont calées pour optimiser les coefficients de détermination entre IPA et \log_{10} des flux. Elles sont 10 jours pour n la durée antérieure considérée et 0.75 pour k le facteur de récession. Le coefficient de détermination de la régression linéaire vaut 0.745, 0.687 et 0.917 pour respectivement LMEP, EO et VV. Pour l'unité hydrologique de l'étang de l'Or, le coefficient de détermination est significativement plus faible. La configuration est différente pour cette unité hydrologique. En faisant l'hypothèse que le volume d'eau de l'étang de l'Or qui est à l'aval tamponne la dynamique des flux de contaminants en provenance du bassin versant nous avons considéré un effet retard. Pour cette unité hydrologique les conditions hydrométéorologiques seront caractérisées par l'IPA de la veille de la journée d'observation. En adoptant cette hypothèse le coefficient de détermination progresse de 0.687 à 0.817 (cf. Figure 4). L'IPA explique de 75% à 92% de la variabilité des flux journaliers de CTT. Les coefficients des droites de régression diffèrent selon les unités hydrologiques. La régression statistique IPA-flux de contaminants est significativement différente selon les unités hydrologiques. Un modèle statistique de prédiction des apports du bassin qui englobe les conditions hydrométéorologiques et les pressions anthropiques sur les unités hydrologiques est en phase de construction.

A titre de validation du modèle, les flux de CTT mesurés lors des campagnes de l'année 2014 sont reportés par des croix rouges sur la Figure 4. Les conditions hydrométéorologiques observées correspondent à des valeurs faibles de l'IPA. Si on prend en compte les incertitudes d'estimation et de mesure, les ordres de grandeur des flux simulés et observés sont équivalents. Cependant d'une manière générale les valeurs de flux estimés par le modèle sont légèrement supérieures aux valeurs des flux observés. On peut attribuer cette surestimation du modèle aux conditions hydrométéorologiques particulières de l'automne 2014 et aux événements de crues extrêmes qui ont précédé les jours de mesure des flux. En effet, les jours de campagne J2 et J3 ont eu lieu quelques jours après des crues extrêmes qui compte tenu de leur forte amplitude ont épuisé les stocks de contaminants sur les surfaces des bassins et dans les lits des cours d'eau. En conséquence la disponibilité des contaminants par la suite est réduite tant que le stock n'est pas reconstruit. Pour la journée J4 on observe une forte surestimation des flux par le modèle aux exutoires de l'unité hydrologique LMEP. La mesure du flux pour cette journée est imprécise car les conditions de marée et d'écoulement au moment des prélèvements étaient telles que le flux n'a pu être évalué au niveau du fleuve Lez à Palavas. Malgré un très récent événement pluvieux survenu dans les heures qui ont précédé le prélèvement, l'écoulement était de type rentrant pour la totalité de la section d'écoulement.

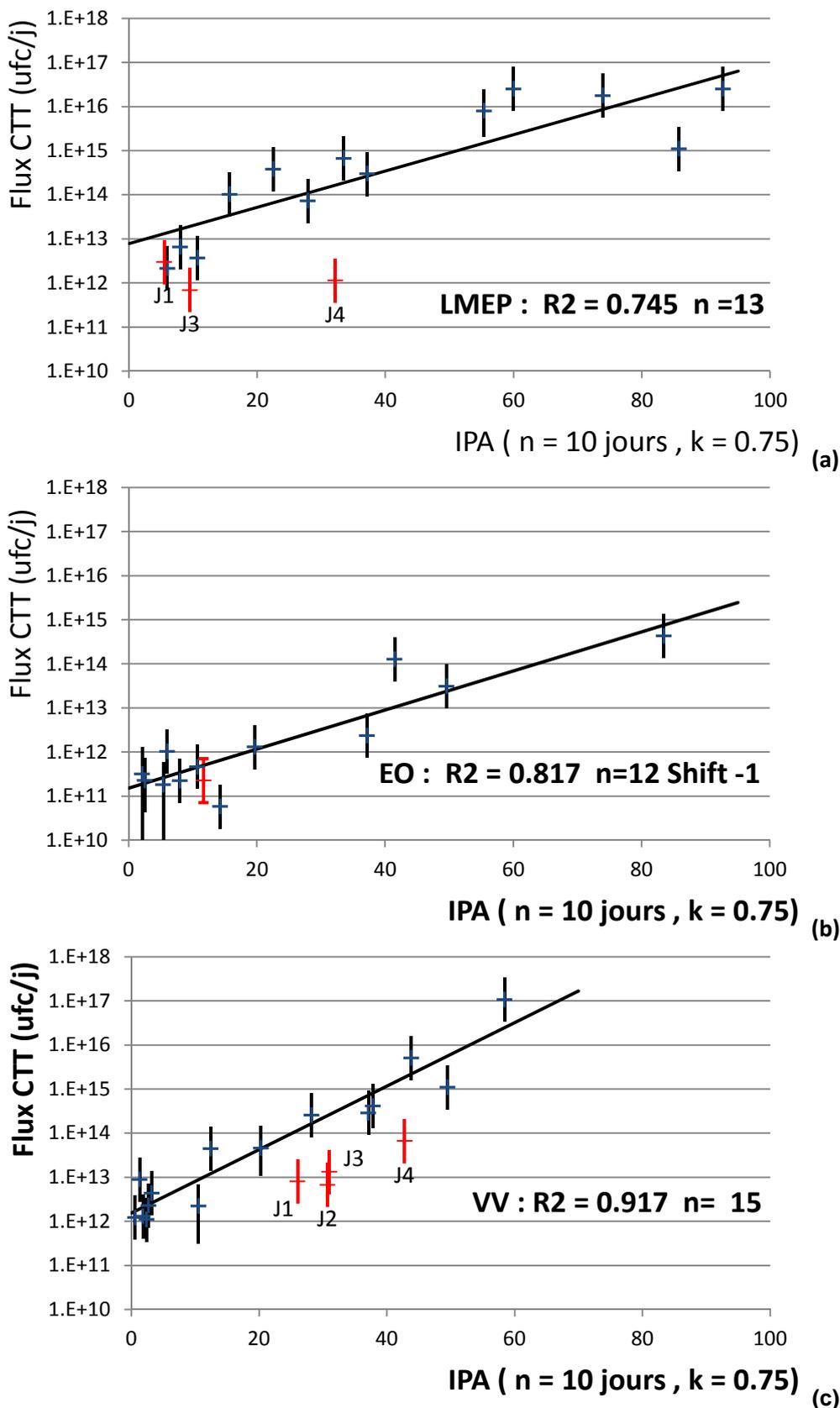


Figure 4 : Modèle statistique des flux de CTT provenant des unités hydrologiques. Régression linéaire entre le flux de ufc_CTT (transformé en log10) et l'indice des précipitations antérieures. Les unités hydrologiques considérées sont (a) bassin Lez-Mosson-Etangs Palavasiens, (b) bassin de l'étang de l'Or et (c) bassin Vistre-Vidourle. Mesures provenant du programme MicroGAM (en noir) et observations réalisées dans le cadre de ce projet (en rouge)

4. Discussion

Le modèle statistique d'apport journalier de contamination bactérienne permet une évaluation des apports annuels de colonies de CTT aux eaux du Golfe d'Aigues-Mortes. Sur la base des chroniques de pluies journalières mesurées aux stations Météo-France nous avons déterminé les IPA journaliers pour modéliser les flux journaliers et nous avons évalué les apports annuels du bassin versant du GAM. L'application du modèle aux années antérieures à la période d'observation fait l'hypothèse de stabilité des paramètres du modèle et des conditions de pressions anthropiques. Il s'agit de tester et d'illustrer la sensibilité du modèle à la variabilité de la pluviométrie.

4.1 Variabilité inter-annuelle des flux bactériens

L'évaluation du flux journalier repose seule sur la valeur de l'IPA calculé à partir du hyétogramme. La gamme d'observation des IPA pour le calage du modèle est [0-95 mm]; et [0-58 mm] pour respectivement Montpellier et Nîmes. Les valeurs des IPA calculés à partir de la chronique des pluies qui couvre la période sept. 94 à août 2013 sont dans la gamme des IPA utilisée pour le calage à 99.7% pour le pluviomètre de Montpellier et 98.7 % pour le pluviomètre de Nîmes. Pour les journées telles que l'IPA dépasse la gamme des valeurs, deux évaluations des flux sont proposées. Une évaluation basse qui considère une extrapolation par valeur constante au-delà de la gamme d'IPA observé pour le calage du modèle. L'évaluation haute extrapole linéairement le flux selon l'IPA. Cette évaluation haute sera limitée à une valeur seuil qui est le nombre de CTT qui peut être produit par la population du bassin du GAM par jour. Selon Dupray et al. (1999), un homme rejette $2.14 \cdot 10^9$ *escherichia coli*. par jour. La population du bassin du GAM est environ 834 000 habitants. Si l'on considère un abattement de deux unités log entre le rejet et l'exutoire, le flux maximum journalier depuis le bassin du GAM ne peut excéder $1.8 \cdot 10^{23}$ ufc CTT/jour.

La Figure 5 reporte les flux annuels simulés de CTT. Le mode d'extrapolation a un fort impact sur le flux annuel. Le nombre de journées par an pour lesquels l'IPA est au-delà de la gamme des IPA du calage du modèle est faible. Il est de une à deux journées pour la série des pluies de Montpellier et 4 à 5 journées pour la série de Nîmes. Sous hypothèse d'extrapolation par valeur constante, la moyenne interannuelle est $4 \cdot 10^{17}$ ufcCTT/an, l'écart type est $2.6 \cdot 10^{17}$ ufcCTT/an. A l'échelle annuelle l'apport est compris entre $5 \cdot 10^{16}$ et $9 \cdot 10^{17}$ ufc de CTT par an. Dans l'hypothèse d'une extrapolation linéaire du modèle la moyenne interannuelle est $2 \cdot 10^{22}$ ufcCTT/an soit cinquante mille fois plus importante que l'hypothèse basse. L'écart type est $4.2 \cdot 10^{22}$ ufcCTT/an. A l'échelle annuelle l'apport est compris entre $5 \cdot 10^{16}$ et $2 \cdot 10^{23}$ ufc de CTT par an. Ce résultat confirme la prépondérance des événements de crises sur le bilan annuel des apports et démontre la large incertitude du modèle statistique de flux qui résulte de la difficulté à mesurer les apports en situation de crise majeure.

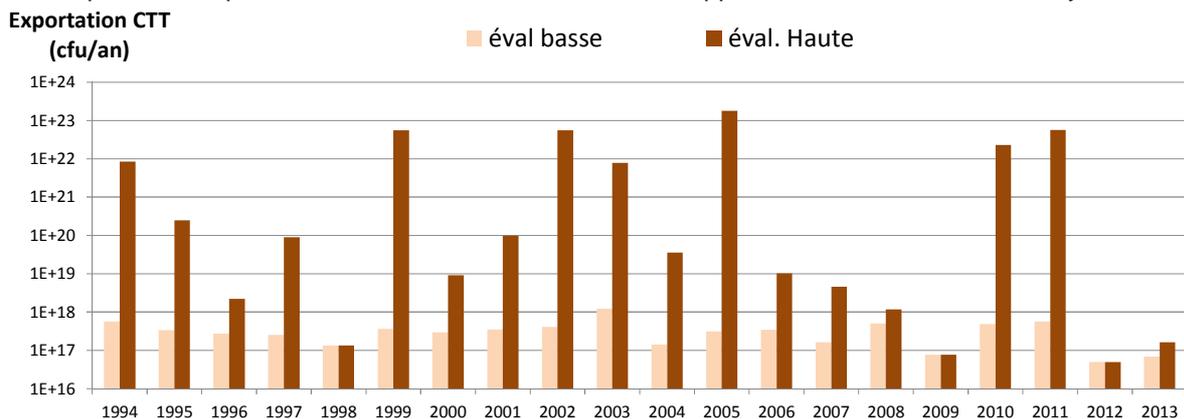


Figure 5 : Simulation de l'apport annuel de bactéries CTT au Golfe d'Aigues-Mortes pour la période 1994-2013. Evaluation haute et évaluation basse selon les modes d'extrapolation du modèle de flux dans les situations de crise.

4.2 Flux prospectifs dans des conditions de changements climatiques

A partir des chroniques de pluies journalières issues de la base de données Med-Cordex pour le bassin du GAM pour le 21ème siècle, les flux annuels sont simulés. Les hypothèses liées à ces simulations sont la stabilité des paramètres du modèle statistique, la stabilité des pressions anthropiques sur le bassin et la validité des caractéristiques des chroniques de pluie simulées par le

MRC à de fines échelles spatio-temporelles 12 km de résolution spatiale et un pas de temps égal à la journée. Deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont considérés, le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5. Les moyennes mensuelles inter-annuelles des pluies observées pour la période 1994-2014 et des pluies simulées pour la période 2006-2099 sont représentées.

Les résultats reportés sur la Figure 6 sont les flux de CTT moyens inter-annuels et le minimum et maximum annuel par décennie. La période couverte va de l'année 2006-07 à 2095-96. Les exportations estimées à partir des chroniques de pluies 'anciennes' mesurées pour la période passée 1994-2014 sont reportées en comparaison. La gamme de flux annuels extrapolés par le modèle statistique à partir des séries pluviométriques issues des simulations climatiques de GCM pour deux scénarios de changement est dans des ordres de grandeurs équivalents aux flux simulés pour les deux dernières décennies. Globalement les flux estimés selon le scénario 4.5 sont inférieurs aux flux du scénario 8.5. Cependant cette différence n'est pas significative. Sous hypothèse que la population et les pressions sur le bassin restent stables, ce résultat montre que l'impact du seul changement climatique sur les flux de CTT est modéré.

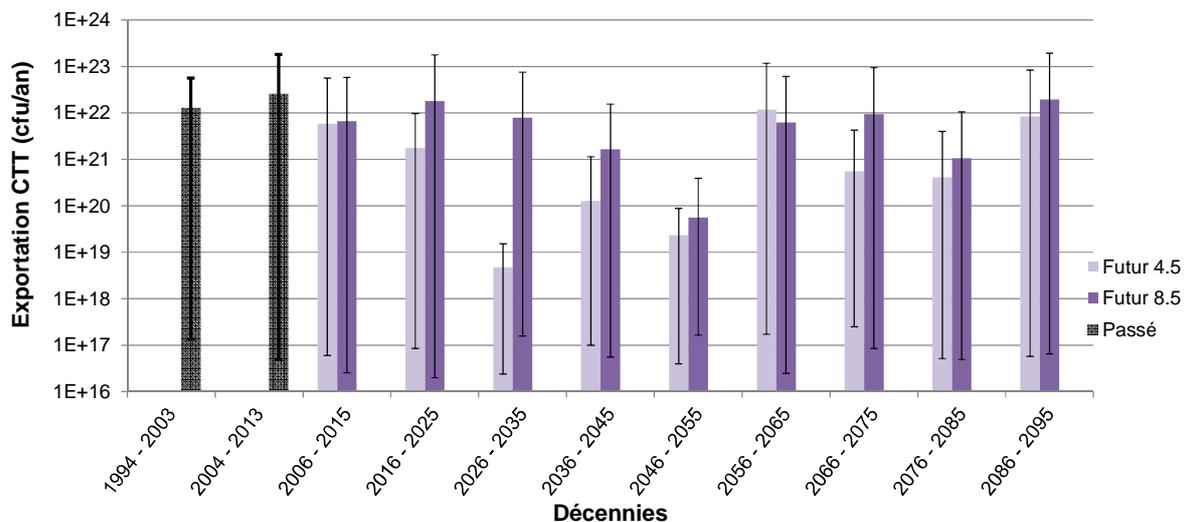


Figure 6 : Simulation des flux de CTT du bassin du GAM pour le 21^{ème} siècle. Moyennes inter-annuelles par décennie, maximum et minimum selon les deux scénarios de changement (4.5 et 8.5) en comparaison avec les valeurs simulées sur la période 1994-2014.

5. Conclusions et perspectives

Un modèle statistique reliant les flux de contamination microbienne et les conditions hydrométéorologiques caractérisées à partir des pluies journalières est développé et appliqué pour décrire la variabilité temporelle des flux annuels et évaluer les flux pendant le siècle à venir pour des prévisions de conditions climatiques changeantes. Il est montré d'une part, que la majorité du flux annuel provient d'un nombre limité d'évènements pluvieux intenses et d'autre part que l'évaluation quantitative lors de ces évènements intenses est entachée d'une très forte incertitude. Les résultats de prédictions du modèle climatique Météo-France (CNRM) ont été utilisés en fonction de deux scénarios différents – RCP4.5 (peu pessimiste) et RCP8.5 (très pessimiste) – afin d'évaluer l'évolution possible des flux microbiens. L'analyse décennale des flux microbiens prédits en ne considérant que le seul changement climatique semble montrer une stabilisation des flux sans évolution significative par rapport au passé et ce quel que soit le scénario. Cependant, les simulations devront être complétées en utilisant de nouvelles simulations de pluie disponibles dans la base de données MED-Cordex et réalisées à l'aide de modèles climatiques différents.

La modélisation proposée dans ce rapport d'étape ne prend en compte que les conditions hydrométéorologiques. La différence des paramètres du modèle de flux selon les unités hydrologiques rend nécessaire de faire appel à une variable explicative supplémentaire qui soit caractéristique des pressions sur l'unité. La démarche de sélection d'indicateurs des pressions sur les unités hydrologiques est en cours de développement. Des indicateurs des pressions

anthropiques discriminants sur les unités hydrologiques sont en cours d'élaboration. Les indicateurs seront basés sur les pratiques et les usages des sols et de l'eau. Les indicateurs proposés rendent compte d'emprises au sol, de densités, de concentrations et de volumes. Ces indicateurs rendent compte directement de la contamination (volumes de rejet) ou indirectement (densité de population, pourcentage de surfaces imperméabilisées...).

Les indicateurs seront déterminés d'une part à l'échelle de l'unité hydrologique et d'autre part en considérant des zones d'influence identifiées. Les zonages considérés sont des bandes terrestres de 1000m et de 6000m à partir du trait de côte pour rendre compte du voisinage de la bande littorale ou des couloirs centrés sur les principaux cours d'eau du réseau hydrographiques (cf. Figure 7) Une modélisation basée sur une régression multiple entre flux et variables explicatives liées aux conditions hydrométéorologiques et indicateurs de pressions anthropiques sera proposée quand nous disposerons d'un panel représentatif d'indicateurs de pressions anthropiques.

Pour définir des indicateurs de l'occupation du sol et de l'urbanisation dans le futur on pourra se référer aux scénarios déjà éprouvés pour l'agglomération de Montpellier lors du projet européen Plurel (www.plurel.net) que l'on étendra à l'ensemble de la zone concernée via la plateforme OCELET (http://pad.teledetection.fr/oceletwiki/mediawiki-1.15.3/index.php/Main_Page). Puis, à partir de scénarios d'évolution prévisible des indicateurs des changements locaux du fait de l'urbanisation, l'estimation des apports futurs pourra être complétée.

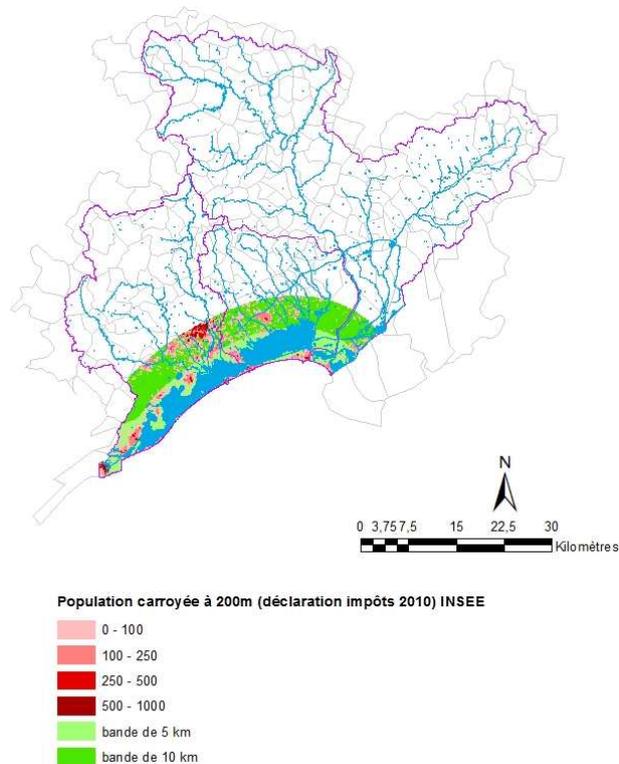


Figure 7 : Exemple de zonage de l'espace des unités hydrologiques pour évaluer des indicateurs de pressions anthropiques sur la bande littorale

Sur le plan de l'observation, la mesure simultanée des flux à l'ensemble des exutoires du bassin du GAM qui devrait s'attacher de manière prioritaire aux événements, est rendu difficile car d'une part, elle mobilise de lourds moyens sans anticipation possible (prévision difficile à court terme et courte durée des événements) et d'autre part, lors de ces événements, les voies d'accès au littoral sont le plus souvent inondées et fermées.

L'évaluation des flux de contaminants tels que les éléments traces et les composés organostanniques au plus près du littoral, est rendu plus complexe. La présence d'eaux saumâtres, mélange d'eau douce qui provient des écoulements du bassin versant et d'eau salée qui provient du Golfe influence les phénomènes d'adsorption-désorption sur les particules en suspension. L'origine des éléments en phase dissoute peut être marine ou en provenance du bassin versant. La seule observation aux exutoires de la teneur en élément dissous sans connaissance des teneurs en mer ne permet pas d'identifier les origines des contaminants.

Bibliographie citée

- Dupray E., Caprais M.P., Derrien A., Monfort P., Convent A., Penor J., Fach P., Dilasser F., Perelle F., Grout J., Federighi M., Juguiau F., Rama F., 1999. Rejets agricoles et bactériologie (baie de Fresnaye). Rédigé dans le cadre du programme Bretagne eau pure. Ifremer édit: 71 + Ann.
- Elbaz-Poulichet, F., J.-M. Garnier, D. M. Guan, J.-M. Martin and A. J. Thomas (1996). "The Conservative Behaviour of Trace Metals (Cd, Cu, Ni and Pb) and As in the Surface Plume of Stratified Estuaries: Example of the Rhône River (France)." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 42(3): 289-310
- Koehler, M. A. & Linsley, R. K., 1951. Predicting the runoff from storm rainfall. Research Paper no. 34, Weather Bureau, US Dept of Commerce, Washington, USA
- Martin, J. M. & Windom, H. L. 1990 Present and future role of ocean margin in regulating marine-biogeochemical cycle of trace elements. *Proceeding of Dahlem Conference Marginal Seas Processes in Global Changes* (Mantoura, R. F. C., Martin, J. M. & Wollast, R., eds). pp. 45–67
- Monfort, P., Lerrede, Y., Tournoud, M.G. et Valette F., 2012. Modélisation des Contaminations bactériennes d'origine fécale du Golfe d'Aigues-Mortes en vue d'une gestion de risques en temps réel. Rapport scientifique final (Part 1-2-3-4)– Programme Liteau III.