





ETUDE SUR LES PHENOMENES DE PERSISTANCE DE LA POLLUTION BACTERIENNE DE LA PLAGE DE L'HUVEAUNE APRES UN EPISODE PLUVIEUX

RAPPORT FINAL

Rédigé par L. PISCHEDDA / N. HESSE (SERAMM)

Validé par C. NEGRE et T. OHAYON (SERAMM)

Seramm

SERvice d'Assainissement Marseille Métropole

Table des matières

1 Résumé de l'étude 5

2 Introduction 7

3 Phase 1 : Acquisition d'observations in situ et analyses 9

3.1 Examen des rejets de réseaux 9
3.1.1 Méthodologie 9
3.1.2 Identification des sources de pollution par temps sec 11
3.1.3 Identification des sources de pollution par temps de pluie 13

3.2 Examen des sédiments 15
3.2.1 Evolution du lit de l'Huveaune 15
3.2.2 Caractérisation de la charge bactérienne des sédiments 23

3.3 Examen des nappes d'eau et des résurgences 25
3.3.1 Méthodologie 25
3.3.2 Caractérisation des nappes 25

3.4 Dynamique bactériologique au niveau de l'embouchure de l'Huveaune 28
3.4.1 Périmètre de la zone d'étude et maillage de la zone de baignade 28
3.4.2 Déroulement des campagnes 29
3.4.3 Paramètres mesurés 30
3.4.4 Mesures bactériologiques et physico-chimiques par temps sec 31
3.4.5 Mesures bactériologiques et physico-chimiques par temps de pluie 32

3.5 Bilan des campagnes de mesures 46

4 Phase 2 : Modélisation numérique 47

4.1 Modèle hydrodynamique 47

4.2 Modèle de réseau 48

4.3 Détermination des conditions critiques de vent 48

4.4 Estimation des échanges entre les sources et le milieu 49

4.5 Caractérisation de l'impact des sources sur les plages 49
4.5.1 Impact des eaux résiduelles du DO Prado 49
4.5.2 Impact des eaux résiduelles du ruisseau de Bonneveine 51
4.5.3 Impact des eaux résiduelles de la rivière Huveaune 54

4.6 Bilan modélisation 55

5 Phase 3 : Propositions 56

5.1 Isolement du DO Prado 56
5.1.1 Solution sans pompage 56
5.1.2 Solution avec pompage 57

5.2 Prolongation du DO Prado 57

5.3 Stockages 57
5.3.1 Stockage dans la conduite 57
5.3.2 Bassin de stockage 58

5.4 Rinçage du DO 59
5.4.1 Modélisation de la solution de rinçage 62

6 Conclusion 68

7 Annexes 69

1 RESUME DE L'ETUDE

Le Service de la Santé Publique et des Handicapés de la Ville (SSPH) de Marseille a commandé en 2014 une étude ayant pour objectif d'**expliquer les phénomènes de persistance de la pollution bactériologique sur la plage de l'Huveaune** dans les jours qui suivent un épisode pluvieux ainsi que l'établissement de propositions de gestion adaptées.

L'étude a été structurée en 3 phases :

- Phase 1 : Acquisition de données (campagnes de prélèvements et analyses),
- Phase 2 : Diagnostic à l'aide de la modélisation marine,
- Phase 3 : Formulation de propositions.

L'étude ayant été rendue en août 2018, elle n'a pu prendre en compte les évènements de la saison 2018 qui a vu 5 épisodes de reprise de son lit naturel par l'Huveaune impacter la qualité des eaux de baignade des plages proches de son embouchure. Elle a donc été complétée par un addendum traitant du retour d'expérience de cette saison.

Phase 1 : Acquisition de données

Par temps sec, les données collectées amènent à conclure que la seule source de pollution potentiellement impactante pour le milieu est le rejet d'eaux usées. Les enquêtes réalisées ont identifié un exutoire contaminé. Cette pollution a depuis été supprimée. Les nappes d'eau et les sédiments ne représentent qu'un réservoir limité de bactéries, qui plus est faiblement mobilisable par temps sec.

Les campagnes de mesures réalisées à la suite de pluies significatives ont permis :

- D'écarter la surverse de Borely, les exutoires pluviaux, les sédiments et les nappes d'eau comme sources contribuant à la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune,
- De valider la contribution potentielle de la rivière Huveaune, du ruisseau de Bonneveine, et du DO Prado à ce même phénomène de persistance.

En revanche, certains phénomènes qui avaient été identifiés comme jouant potentiellement un rôle dans la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune n'ont pas pu être validés par les campagnes, à savoir :

- La remise en suspension de sédiments,
- Le retour du panache de l'Huveaune.

Phase 2 : Modélisation numérique

La phase de modélisation avait pour but d'évaluer la contribution potentielle des eaux de l'embouchure de la rivière Huveaune, du ruisseau de Bonneveine, et du DO Prado au phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune.

L'exploitation de la modélisation numérique a permis de constater que :

- Les eaux stagnantes du DO Prado peuvent effectivement contribuer au phénomène de persistance de la dégradation sur une durée potentiellement longue (supérieure à 4 jours).
- Dans les conditions de vent simulées, il semble peu probable que l'eau stagnante dans le ruisseau de Bonneveine contribue à une dégradation prolongée de la plage de l'Huveaune. L'apport d'une dégradation sur la plage de Borely pendant plusieurs jours à la suite d'un épisode de pluie est cependant envisageable d'après les résultats.

- L'eau qui stagne dans la rivière Huveaune pourrait dégrader la plage de l'Huveaune pendant plusieurs jours à la suite d'un épisode de pluie significatif. A priori, la durée de l'impact serait cependant plus faible que celle liée au DO Prado.

Phase 3 : Propositions

Le DO Prado étant identifié comme la source la plus probable de persistance des épisodes de pollution, la réflexion sur les solutions se sont concentrées sur cette source. Cependant les solutions proposées sont également applicables, moyennant un ajustement des coûts, à l'exutoire du ruisseau de Bonneveine.

Solutions	CAPEX (k€)	OPEX (k€/an)	Avantages	Inconvénients
Stockage en conduite	600	80		Volume disponible insuffisant pour 2/3 des déversements
Isolement par vanne	2 200	80	Réduction des rejets au milieu naturel	Risque d'inondation en cas de blocage de la vanne
Rinçage	600	50	Participe au renouvellement des eaux de l'embouchure Peut être couplé à une injection de désinfectant	Efficacité à confirmer par la réalisation d'un test Nécessite un pilotage en fonction des conditions du milieu
Prolongation du DO sur 1000 m	20 000	-		Efficacité limitée car risque de retour avec les courants Complexité réglementaire et environnementale Coût important
Bassin de rétention 50 000 m³	50 000	500	Réduction des rejets au milieu naturel	Coût très important Perturbation des usages pendant les travaux Inefficace pour 20% des déversements qui dépassent les 50 000 m³

Seule la solution du rinçage semble constituer un compromis prix / efficacité / fiabilité acceptable.

Retour d'expérience de saison de baignade 2018

La saison de baignade 2018 a été marquée par une pluviométrie importante : les pluviomètres ont en effet enregistré un cumul moyen de 139 mm sur les mois de juin, juillet et août. L'analyse de la pluviométrie des années précédentes montre qu'il faut remonter à l'année 2002 pour trouver un été aussi pluvieux et présentant autant de retours de l'Huveaune dans son lit.

Lors de cette saison, les épisodes de fermetures prolongées de la plage de l'Huveaune ont été précédés d'un déversement dans les conduites en eau et notamment le DO Prado. Ces constats sont cohérents avec les conclusions de l'étude.

2 INTRODUCTION

La Ville de Marseille est une station balnéaire qui propose **21 zones de baignade** aux caractéristiques variées et couvrant 90 000 m^2 sur 57 km de littoral.

La réglementation relative au contrôle sanitaire de la qualité des eaux de baignade en mer est régie par une Directive européenne 2006/7/CE qui impose une **qualité bactériologique dont dépend le classement des zones de baignade**. Ce classement prend en compte les résultats d'analyses de l'année en cours et des 3 années précédentes. **Les plages classées en catégorie « insuffisante » pourront être interdites à la baignade pour une durée d'un an**, et après cinq classements consécutifs « insuffisants », l'interdiction de baignade deviendra permanente.

La réglementation impose également de prendre des mesures pour que l'eau de baignade soit au moins de qualité " suffisante ", en vue d'atteindre la qualité " excellente " ou " bonne ". Sur la base du recensement des sources de pollution établi dans les profils de baignade en 2011, la Ville de Marseille, la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole (CUMPM) et les services de l'État ont mis en place un **plan d'actions visant à améliorer la qualité des eaux de baignage des plages** de Marseille en agissant sur les pollutions de fond qui impactent les plages par temps sec et sur les conséquences des épisodes pluvieux.

L'amélioration de la qualité des eaux de l'Huveaune est une des mesures prioritaires du plan d'actions.

L'Huveaune est un fleuve qui prend sa source dans la commune de Nans-les-Pins (Var) sur le versant Nord de la Sainte-Baume, à 590 m d'altitude. Il traverse dans sa partie basse les communes d'Aubagne, de la Penne-sur-Huveaune et de Marseille, et draine un bassin versant de 373 km^2.

Depuis 1979, **l'Huveaune, et son principal affluent, le Jarret, sont détournés par temps sec** au niveau du site de la Pugette vers la Calanque de Cortiou afin de préserver la qualité des plages du Prado. Lors d'un épisode pluvieux significatif (> 8 mm/heure ou 30 m^3/sec), la vanne barrage du site de la Pugette est abaissée et l'Huveaune reprend son cours naturel jusqu'aux plages du Prado. **Ces eaux représentent une source de pollution bactériologique** importante qui affecte notamment la plage de l'Huveaune. Ces événements se produisent en moyenne 2 à 3 fois durant la saison estivale entraînant la fermeture momentanée des plages impactées. Par ailleurs, la pollution peut perdurer pendant plusieurs jours après l'épisode pluvieux sur la plage de l'Huveaune alors que ce phénomène n'est pas observé sur les autres plages. Au-delà de 72 h, cela impacte le classement de la zone de baignade.

Même si la qualité de l'eau de la plage de l'Huveaune s'améliore, **la plage de l'Huveaune reste une plage à risque en raison de la proximité du cours d'eau.**

L'embouchure des rivières Huveaune et Bonneveine, jonction entre le milieu continental et littoral, est une zone à l'hydrodynamique complexe. Cette complexité est liée au nombre important de forçages météo-océaniques interagissant pour déterminer les courants marins et les transports associés, ainsi qu'aux apports bactériens multiples dans la zone (apports ponctuels, diffus, amont, aval, etc…). Le vent est en particulier un forçage dominant qui rythme les échanges au sein de la colonne d'eau et qui permet le renouvellement des masses d'eau.

Les apports d'eau douce des rivières sont à l'origine d'une stratification verticale significative de la colonne d'eau (rencontre entre des eaux douces plus légères et des eaux marines salées et donc plus lourdes). Cette stratification est un phénomène crucial dans la dynamique du panache de la rivière, et donc également dans l'évolution des charges bactériennes associées au panache à proximité des plages.

Enfin, **les orages intenses** ayant lieu dans la région exercent une modulation supplémentaire des apports de la rivière, en occasionnant des **variations rapides du débit pouvant entrainer une chasse des eaux souillées vers la mer**.

Pour toutes ces raisons, le Service de la Santé Publique et des Handicapés de la Ville (SSPH) de Marseille a commandé en 2014 une étude ayant pour objectif d'**expliquer les phénomènes de persistance de la pollution bactériologique sur la plage de l'Huveaune** dans les jours qui suivent un épisode pluvieux ainsi que l'établissement de propositions de gestion adaptées.

Cette étude vise **à identifier les sources de pollution**, entre la vanne barrage de la Pugette et la plage de l'Huveaune, **susceptibles de provoquer ou d'amplifier la pollution de la zone de baignade**, et ce :

- par temps sec,
- par temps de pluie sans crue de l'Huveaune,
- par temps de pluie entraînant le retour de l'Huveaune dans son lit naturel.

Elle comprend le recensement et l'analyse des rejets, nappes d'eau permanentes et zones d'envasement ainsi que par la réalisation de campagnes d'analyses sur la zone de baignade de la plage de l'Huveaune par temps sec et après un épisode pluvieux.

Sur la base de ces données, une modélisation numérique a été mise en œuvre pour comprendre les phénomènes de persistance de la pollution bactérienne. Des propositions sont formulées sur la base du diagnostic établi.

L'étude est décomposée de la manière suivante :

- **Phase 1** : Acquisition d'observations *in situ* et analyses (campagnes de prélèvements et analyses),
- **Phase 2 :** Diagnostic à l'aide de la modélisation marine pour appréhender la dynamique bactériologique de la zone d'étude,
- **Phase 3 :** Propositions - Formulation et validation par modélisation.

3 PHASE 1 : ACQUISITION D'OBSERVATIONS IN SITU ET ANALYSES

Cette première phase de l'étude a pour but :

- d'établir un état des lieux des sources de pollution potentielles suivantes : réseaux, sédiments, et nappes d'eau.
- de caractériser la dynamique bactériologique de l'embouchure et de la plage de l'Huveaune sur la base de campagnes de temps sec et de temps de pluie. Ces éléments servent ensuite à alimenter le modèle hydrodynamique de la zone utilisé en phase 2.

3.1 Examen des rejets de réseaux

3.1.1 Méthodologie

Une campagne de terrain exhaustive par temps sec a été réalisée au démarrage de l'étude (février 2015) afin de caractériser l'ensemble des exutoires présents dans le lit de l'Huveaune. Aucun épisode pluvieux significatif ne s'est produit durant les 7 jours précédant la campagne.

58 exutoires ont été répertoriés. Ils sont décrits dans le Tableau 1 et localisés en Annexe 1.

Différents types d'exutoires ont été observés lors de la campagne :

- ouvrage pluvial public géré par le SERAMM,
- ouvrage public utilisé comme déversoir d'orage du réseau unitaire, géré par le SERAMM,
- ouvrage pluvial privé non géré par le SERAMM.

La plupart des exutoires sont situés au-dessus du niveau de l'eau entre le pont du Parc Borely et le site de la Pugette, et au-dessous du niveau de la mer entre ce même pont et l'embouchure.

Concernant les exutoires présentant un écoulement, les agents ont :

- estimé le débit en chronométrant la vitesse de remplissage d'un récipient de 1 litre pour les exutoires présentant un écoulement (méthode d'empotage),
- mesuré la température *in situ* de l'eau échantillonnée à l'aide d'un thermomètre,
- effectué un prélèvement d'eau en veillant à préserver l'échantillon de toute contamination. Les mains ont été décontaminées avant chaque prélèvement en utilisant du gel hydro-alcoolique. Le prélèvement a été effectué à l'aide d'un flacon stérile de 500 ml, et stockés dans une glacière contenant des pains de glace (obscurité, 4°C environ). L'aspect de l'échantillon (clair ou trouble) a également été noté.

  L'ensemble des informations relevées sur les échantillons ont été inscrites sur une fiche terrain (Annexe 2).

Une campagne par faible pluie a également été réalisée afin de caractériser les apports dans ces conditions météorologiques.

Tableau 1 : recensement des exutoires dans le lit de l'Huveaune

N°	Ouvrage	Public	Privé	Coordonnées géographiques		Date/Heure	Débit (L/s)
				Nord	Est	12/02/2015	
1	Ouvrage pluvial PC50	X		43°16'7.88"	5°23'59.00"	11:01	sec
2	Ouvrage pluvial PC50 (Clapet)	X		43°16'6.16"	5°23'57.52"	10:58	sec
3	Ouvrage pluvial PVC 20 (Clapet)		X	43°16'4.06"	5°23'52.91"	10:56	sec
4	Ouvrage pluvial PVC 20		X	43°16'4.11"	5°23'52.97"	10:56	sec
5	Ouvrage pluvial PVC 20		X	43°16'4.31"	5°23'51.93"	10:54	sec
6	Ouvrage pluvial PVC 25		X	43°16'4.23"	5°23'51.75"	10:53	sec
7	Ouvrage pluvial PC60	X		43°16'3.76"	5°23'49.29"	10:47	0.1
8	Ouvrage pluvial 80		X	43°16'3.69"	5°23'48.40"	10:44	sec
9	Pluvial PO12580	X		43°16'2.93"	5°23'48.13"	10:43	sec
10	Ouvrage pluvial clapet 30		X	43°16'3.20"	5°23'45.42"	10:42	sec
11	Pluvial PC100 condamné (chantier)	X		43°16'3.9"	5°23'45.851"	10:41	sec
12	Ruisseau de la Gouffonne PR250/280	X		43°16'2.99"	5°23'37.59"	10:35	sec
13	Ouvrage pluvial clapet 40		X	43°15'58.44"	5°23'34.43"	10:26	sec
14	Ouvrage pluvial clapet 30		X	43°15'57.43"	5°23'34.21"	10:25	sec
15	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'57.07"	5°23'31.71"	10:24	sec
16	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'57.04"	5°23'31.29"	10:23	sec
17	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'56.54"	5°23'30.83"	10:23	sec
18	Ouvrage pluvial PVC 20		X	43°15'56.88"	5°23'29.147"	10:21	sec
19	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'56.736"	5°23'28.643"	10:20	sec
20	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'56.56"	5°23'27.88"	10:17	0.005
21	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'56.19"	5°23'26.63"	10:16	sec
22	Ouvrage pluvial PO130/80	X		43°15'55.42"	5°23'26.32"	10:14	sec
23	Ouvrage pluvial béton 70		X	43°15'55.43"	5°23'24.92"	10:09	0.6
24	Ouvrage pluvial PVC 20		X	43°15'53.12"	5°23'22.50"	10:05	sec
25	Ouvrage pluvial PO180/108	X		43°15'52.81"	5°23'23.32"	10:04	sec
26	Ouvrage pluvial 40		X	43°15'52.11"	5°23'23.14"	10:02	sec
27	Ouvrage pluvial PR6045	X		43°15'50.41"	5°23'21.35"	10:01	sec
28	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'50.56"	5°23'19.20"	09:56	sec
29	Ouvrage pluvial clapet 20		X	43°15'50.54"	5°23'19.03"	09:56	sec
30	Ouvrage pluvial PC70		X	43°15'47.952"	5°23'13.163"	09:40	0.01
31	Ouvrage pluvial PR160*100	X		43°15'47.15"	5°23'11.75"	09:28	sec
32	Pluvial PC30 public + PC60 privé	X	X	43°15'46.908"	5°23'9.563"	09:26	sec
33	Ouvrage pluvial béton 100		X	43°15'46.59"	5°23'9.32"	09:22	sec
34	Ouvrage pluvial béton 30		X	43°15'45.41"	5°23'5.80"	09:16	sec
35	Ouvrage pluvial béton 60		X	43°15'45.65"	5°23'1.14"	09:10	sec
36	Ouvrage pluvial 15	X		43°15'45.72"	5°22'58.079"	09:08	sec
37	Ouvrage pluvial PVC 15	X		43°15'45.468"	5°22'56.963"	09:05	sec
38	Ouvrage pluvial PVC 15	X		43°15'45.468"	5°22'56.963"	09:05	sec
40	Ouvrage pluvial PVC 15		X	43°15'44.532"	5°22'53.939"	09:03	sec
39	Ouvrage pluvial PVC 5		X	43°15'45.396"	5°22'56.496"	09:00	sec
41	Pluvial PC100*200	X		43°15'44.05"	5°22'54.17"	08:52	0.3
42	Pluvial PC50 surverse lac Borely	X		43°15'43.95"	5°22'53.82"	08:51	0.6
43	Ouvrage pluvial 15		X	43°15'44.244"	5°22'52.751"	08:51	sec
44	Ouvrage pluvial 15		X	43°15'43.848"	5°22'51.528"	08:50	sec
45	Ouvrage pluvial PVC 30		X	43°15'43.704"	5°22'51.059"	08:49	sec
46	Ouvrage pluvial 15		X	43°15'43.488"	5°22'50.195"	08:48	sec
47	Pluvial PC40 (clapet)	X		43°15'43.10"	5°22'50.35"	08:34	0.01
48	Ouvrage pluvial PVC 15		X	43°15'43.236"	5°22'49.043"	08:32	sec
49	Ouvrage pluvial PVC 15		X	43°15'42.732"	5°22'47.171"	08:31	sec
50	Ouvrage pluvial PR60*40	X		43°15'41.15"	5°22'44.27"	12:02	0.1
51	Ouvrage pluvial béton 30		X	43°15'40.40"	5°22'42.58"	12:06	sec
52	Ouvrage pluvial béton 60		X	43°15'40.028"	5°22'36.436"	12:07	sec
53	Ouvrage pluvial clapet 30		X	43°15'39.935"	5°22'35.997"	12:07	sec
54	Ouvrage pluvial I Ø60		X	43°15'37.85"	5°22'32.11"	13:17	0.6
55	Ouvrage pluvial PC100	X		43°15'37.61"	5°22'31.59"	12:21	sec
56	Déversoir d'orage du Prado UC280	X		43°15'38.41"	5°22'31.34"	12:23	en eau de mer
57	Ouvrage pluvial béton 40		X	43°15'37.96"	5°22'29.86"	12:47	sec
58	Déversoir d'orage du Prado UC280 - grille	X		43°15'35.19"	5°22'23.97"	12:35	en eau de mer

3.1.2 Identification des sources de pollution par temps sec

Sur les 58 exutoires répertoriés dans le lit de l'Huveaune entre le site de la Pugette et l'embouchure :

- 47 exutoires étaient secs au moment de notre passage ;
- 9 exutoires présentaient un écoulement qui a été quantifié et analysé ;
- les 2 exutoires du déversoir du Prado (dans l'Huveaune et à proximité de la plage de l'Huveaune) étaient en eau. Un prélèvement a toutefois été réalisé devant chacun de ces exutoires pour en évaluer la qualité bactériologique.

Les caractéristiques quantitatives (débit) et qualitatives (qualité bactériologique) des écoulements observés au niveau des exutoires sont présentés dans le Tableau 2 ci-dessous et repris dans une fiche de synthèse en Annexe 2.

Les analyses ont été mises en œuvre selon les méthodes de culture normalisées (NF-EN-ISO 9308-3 et NF-EN-ISO 7899-1) dont le principe et la méthode sont rappelés en Annexe 5.

Tableau 2 : Caractéristiques qualitatives et quantitatives des exutoires présentant un écoulement

N°	Ouvrage	Débit (l/s)	Qualité bactériologique		Flux journalier	
			Escherichia coli (NPP/100 ml)	Entérocoques fécaux (NPP/100 ml)	*Escherichia coli* (NPP)	Entérocoques fécaux (NPP)
7	Ouvrage pluvial PC60	0.1	<40	<40	-	-
20	Ouvrage pluvial PVC 30	0.005	1.E+06	1.E+05	4.7.E+09	6.4.E+08
23	Ouvrage pluvial béton 70	0.6	1670	200	8.7.E+08	1.0.E+08
30	Ouvrage pluvial PC70	0.01	>3,2E+06	>3,2E+06	2.8.E+10	2.8.E+10
41	Pluvial PC100*200	0.3	<40	80	-	-
42	Pluvial PC50 surverse lac Borely	0.6	<40	<40	-	-
47	Pluvial PC40 (clapet)	0.01	260	1450	2.2.E+06	1.3.E+07
50	Ouvrage pluvial PR60*40	0.1	30	15	2.6.E+06	1.3.E+06
54	Ouvrage pluvial l Ø60	0.6	<15	<15	-	-
				Total	**3.3 E+10**	**2.8 E+10**

De manière générale, les écoulements observés lors de la campagne de recensement des exutoires sont relativement faibles, compris entre 0,005 et 0,3 l/s. Néanmoins, trois exutoires présentent un débit plus important, estimé à 0,6 l/s. Il s'agit :

- de l'ouvrage pluvial situé au niveau du pont de l'avenue de Mazargues (exutoire N°23),
- de la surverse du lac Borely (exutoire N°42),
- de l'ouvrage pluvial situé au niveau du pont de l'avenue Pierre Mendès France (exutoire N°54).

Figure 1 : Photographies des exutoires N°23, N°42 et N°54 présents dans le lit de l'Huveaune



Les résultats d'analyses bactériologues (E. coli et Entérocoques fécaux) indiquent :

- la présence d'une pollution sanitaire modérée provenant des exutoires N°23 et 47 (exutoire à clapet en aval de la surverse Borely) représentés sur la Figure 2, et dont la concentration est inférieure à 2 000 NPP/100 ml,

Figure 2 : Photographies des exutoires N°23 et N°47 présents dans le lit de l'Huveaune



- la présence d'une contamination sanitaire importante, supérieure à 10^6 NPP/100 ml, provenant des exutoires N°20 et 30 (Figure 3). L'exutoire N°20 reprend un réseau provenant certainement du stade Magnac ou de la résidence Grand Saint Giniez. L'exutoire N°30 reprend le réseau pluvial d'une résidence située rue Raphaël Ponson. Cet exutoire représente à lui seul 80% de la pollution apportée par les exutoires.

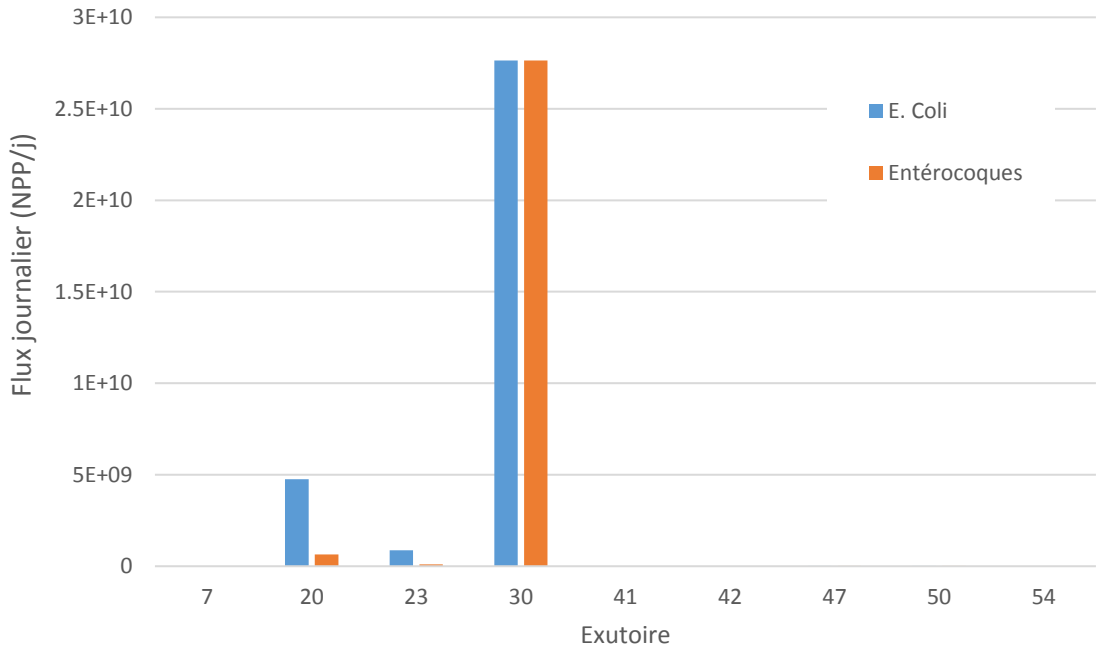
Figure 3 : Photographies des exutoires N°20 et N°30 présents dans le lit de l'Huveaune



Les autres exutoires ne présentent pas de contamination sanitaire.

Le débit et la concentration en Escherichia coli et en Entérocoques fécaux permettent de calculer le flux bactérien quotidien pour chacun des exutoires présentant une pollution sanitaire. Ce dernier est présenté au niveau de la Figure 4 ci-après et montre clairement que les exutoires N°20 et N°30 sont les plus contributeurs.

Figure 4 : Flux bactériens des exutoires présentant un écoulement dans le lit de l'Huveaune



En conclusion :

- Les exutoires des réseaux représentent, dans leur ensemble et par temps sec, une pollution bactériologique équivalente de 30 l d'eau usée (concentration usuelle de 10^8 NPP/100 ml en E. Coli).
- Il apparaît qu'un seul exutoire peut représenter à lui seul plus de 80% des apports par les exutoires pluviaux. La pollution identifiée avait pour origine des exfiltrations d'une canalisation sanitaire de la rue Raphaël Ponson en très mauvais état. Des travaux de chemisage de cette canalisation ont été réalisés depuis.

3.1.3 Identification des sources de pollution par temps de pluie

La campagne de prélèvement par temps de faible pluie (sans abaissement de la vanne barrage) s'est déroulée en mars 2018.

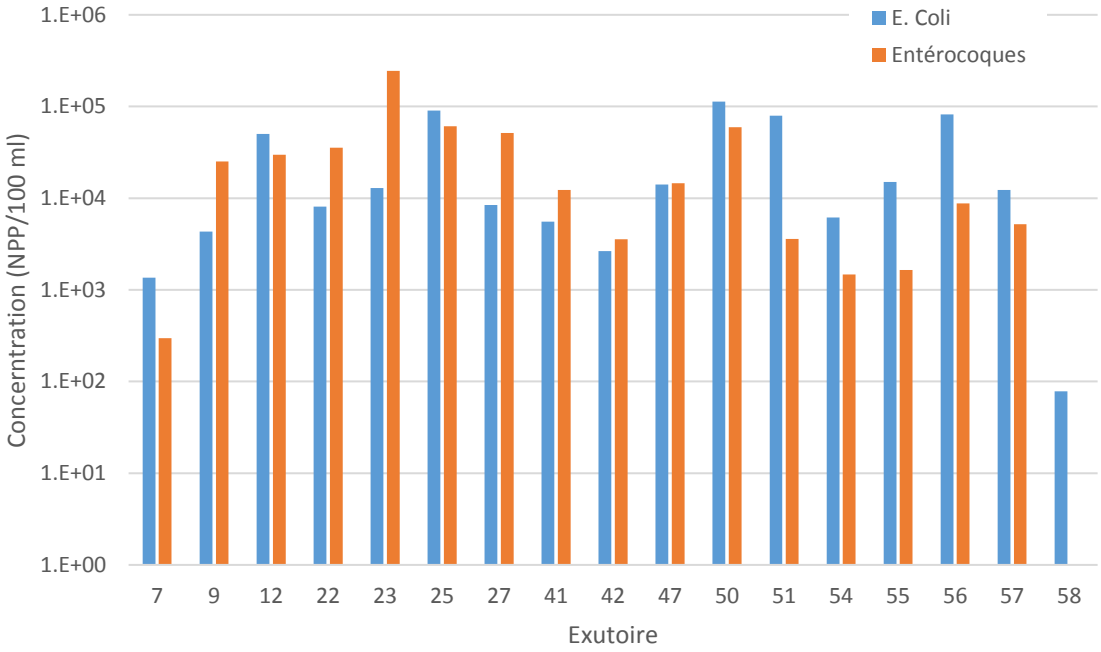
Les procédures de sécurité interdisant l'accès au cours d'eau en cas de pluie, seuls les exutoires accessibles depuis la rive (au nombre de 17) ont pu être prélevés. Ceux-ci sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Caractéristiques qualitatives des exutoires prélevés par temps de petite pluie

N°	Ouvrage	Public	Privé	E. Coli (NPP/100 ml)	Entérocoques (NPP/100 ml)
7	Ouvrage pluvial PC60	X		1.36E+03	2.98E+02
9	Pluvial PO12580	X		4.34E+03	2.51E+04
12	Ruisseau de la Gouffonne PR250/280	X		5.03E+04	2.97E+04
22	Ouvrage pluvial PO130/80	X		8.07E+03	3.55E+04
23	Ouvrage pluvial béton 70		X	1.29E+04	2.44E+05
25	Ouvrage pluvial PO180/108	X		9.04E+04	6.08E+04
27	Ouvrage pluvial PR6045	X		8.41E+03	5.13E+04
41	Pluvial PC100*200	X		5.52E+03	1.23E+04
42	Pluvial PC50 surverse lac Borely	X		2.66E+03	3.55E+03
47	Pluvial PC40 (clapet)	X		1.41E+04	1.45E+04
50	Ouvrage pluvial PR60*40	X		1.13E+05	5.95E+04
51	Ouvrage pluvial béton 30		X	7.95E+04	3.60E+03
54	Ouvrage pluvial I Ø60		X	6.15E+03	1.47E+03
55	Ouvrage pluvial PC100	X		1.51E+04	1.65E+03
56	Déversoir d'orage du Prado UC280	X		8.18E+04	8.75E+03
57	Ouvrage pluvial béton 40		X	1.23E+04	5.20E+03
58	Déversoir d'orage du Prado UC280 - grille	X		7.80E+01	<40

Les concentrations bactériologiques relevées sont globalement comprises entre 10^3 et 10^5 NPP/100 ml. Ces valeurs correspondent à des charges classiques pour des eaux pluviales urbaines.

Figure 5 : qualité bactériologiques des exutoires prélevés par temps de pluie



On notera que ces valeurs sont très en deçà des charges moyennes mesurées par temps de pluie dans l'Huveaune lors de campagnes réalisées par le SERAMM (2,6 10^5 NPP/100 ml en E. Coli pour l'Huveaune (soit 5,42 log).

3.2 Examen des sédiments

Le relief du lit de l'Huveaune résulte d'une succession de phénomènes d'érosion brutale dus à des effets de chasse lorsque la vanne de la Pugette s'ouvre. Dès lors que les écoulements cessent, des phénomènes de sédimentation se produisent et forment des zones d'accumulation de sédiments.

Les analyses à réaliser concernent à la fois les aspects qualitatifs et quantitatifs de ces sédiments. Cette étape doit permettre d'identifier les zones d'envasement susceptibles d'être lessivées lors de l'abaissement de la vanne-barrage et d'analyser si ces zones sont une source potentielle de pollution lorsqu'elles sont remises en suspension.

Dans un premier temps, une cartographie initiale de l'Huveaune a été réalisée afin d'identifier les zones d'accumulation des sédiments. Des relevés ont ensuite été réalisés au cours de l'étude pour caractériser l'évolution de ces zones.

Nota : ces relevés ont également permis d'aborder la problématique des nappes d'eau qui est étudiée dans le paragraphe 3.3.

3.2.1 Evolution du lit de l'Huveaune

3.2.1.1 MÉTHODOLOGIE

L'Huveaune, entre le barrage de la Pugette et son embouchure, comporte deux parties bien différenciées : une partie toujours à sec à l'amont et une partie toujours en eau à l'aval .

En conséquence, deux techniques distinctes ont été mises en œuvre pour étudier l'évolution du lit de l'Huveaune :

- Amont (depuis la vanne barrage jusqu'au pont Borely) : relevés topographiques et relevés par tige coaxiale,
- Aval (depuis le pont Borely jusqu'à l'embouchure) : relevés bathymétriques sur la partie toujours en eau.

Relevés topographiques

Un premier relevé topographique a été réalisé au démarrage de l'étude (février 2015) à l'aide de l'instrument de mesure Leica TCRA 1100 (*Figure 6*). Le tronçon étudié concerne la partie du ruisseau accessible à pied, comprise entre le Parc Borely (140 m en amont du pont) et le site de la Pugette.

La répartition des sédiments sur la zone d'étude a été étudiée par transects en largeur (en moyenne 12 points) et en longueur (tous les 110 m environ). En tout, 184 points ont été relevés.

Un plan reprenant la localisation des profils transversaux effectués dans le lit du ruisseau est présenté en Annexe 3.



Figure 6 : Appareil de relevé topographique Leica TCRA 1100

Relevés par tige coaxiale

Sur la partie accessible à pied de l'Huveaune, des mesures de hauteur de sédiment et hauteur d'eau ont été réalisées sur l'ensemble des profils à l'aide d'une tige coaxiale (*Figure 7*). Ces mesures permettent ainsi :

- de caractériser la nature des fonds (graviers, vase, ….),
- de connaître la hauteur d'accrétion sédimentaire sur l'ensemble du tronçon étudié.

Figure 7 : Relevé à l'aide de la tige coaxiale lors de la campagne 2015



La tige coaxiale se compose d'une barre graduée couplée à un disque empêchant l'enfoncement de la barre dans les sédiments et permettant de mesurer la hauteur d'eau. Les relevés de hauteur d'eau sont exploités dans l'examen des nappes d'eau (cf §.3.3). La deuxième tige graduée coulissant dans le disque s'enfonce dans les sédiments et permet de mesurer la hauteur des sédiments.

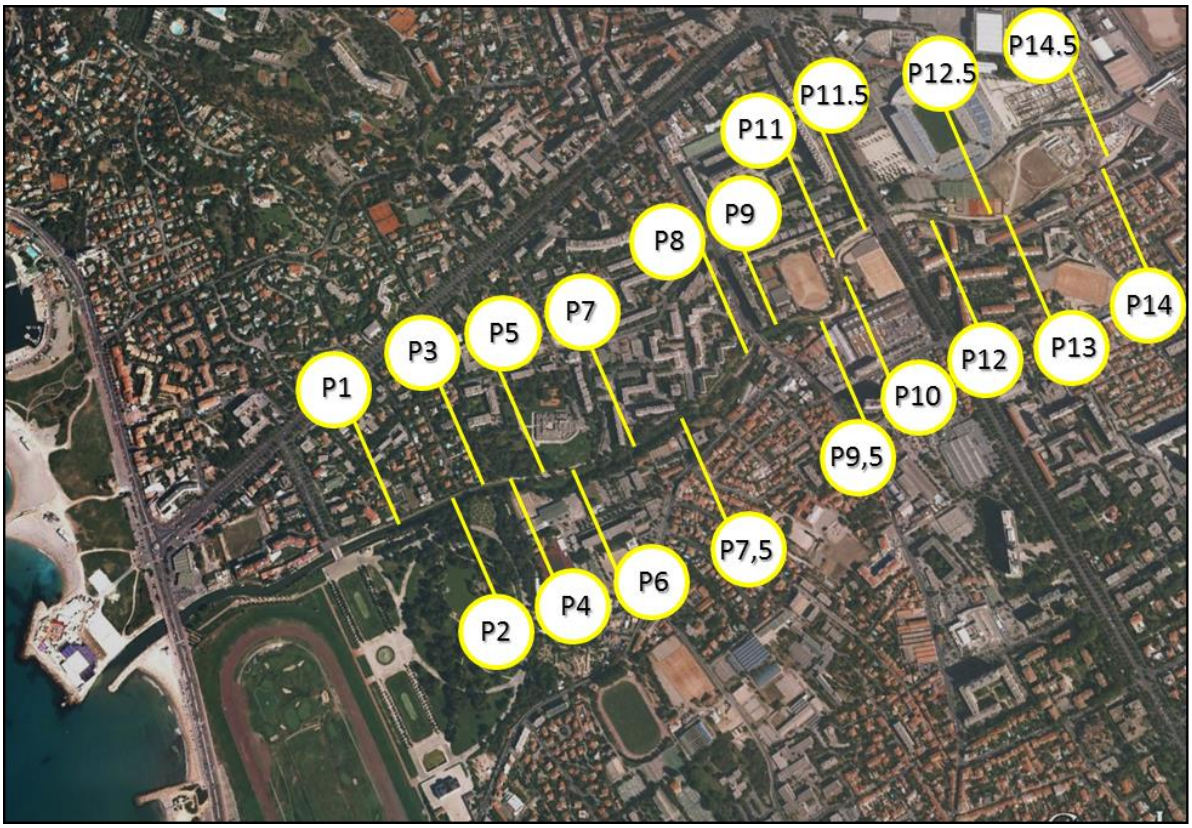
Sur chaque point de mesure, ont ainsi été relevés : la position géographique (repérage GPS), la profondeur totale (tige) et la profondeur du fond (tige avec disque coaxial).

La répartition des sédiments sur la zone d'étude a été étudiée par transects en largeur (en moyenne 3 points) et en longueur (tous les 110 m environ). En tout, 80 points ont été relevés.

Ces relevés ont été réalisés :

1) en tout début d'étude suite au levé topographique (février 2015),
2) suite au premier évènement significatif de reprise du lit de l'Huveaune (juin 2015),
3) en fin d'étude (mars 2018).

Figure 8 : Points de mesure réalisés pendant la campagne de relevés topographiques dans l'Huveaune



Relevés bathymétriques

Sur le tronçon non accessible à pied, c'est-à-dire à l'aval immergé de l'Huveaune, un sondeur multifaisceaux fixé sur le bord d'un bateau permet d'effectuer des mesures de profondeur ainsi qu'un suivi de fond acoustique (Figure 9). Le sondeur permet d'acquérir une cartographie du fond.

Figure 9 : Bateau et du sondeur mis en œuvre lors de la campagne





Les relevés ont été réalisés :

1) en tout début d'étude suite au levé topographique (février 2015),
2) suite au premier évènement significatif de reprise du lit de l'Huveaune (juillet 2015),
3) en fin d'étude (avril 2018).

La Figure 10 ci-dessous illustre un des tracés réalisés au cours de la campagne.

Figure 10 : Tracés bathymétriques dans la partie immergée de l'Huveaune (Source : RPT)



3.2.1.2 AMONT : RESULTATS DES RELEVÉS DES ZONES D'ACCUMULATION DE SÉDIMENTS

L'épaisseur des sédiments relevée sur la partie amont de l'Huveaune est comprise entre 0 et 0,37 m pour une moyenne de 0,13 m.

Tableau 4 : Epaisseurs de sédiments relevées sur l'amont de l'Huveaune

	Hauteur moyenne de sédiment (m)				
Profil	févr-15	juin-15	Evolution jui 2015 / fév 2015	avr-18	Evolution avr 2018/ fév 2015
1	0.10	0.17	+ 0.07	0.13	+ 0.06
2	0.15	0.17	+ 0.02	0.13	+ 0.11
3	0.18	0.21	+ 0.03	0.21	+ 0.18
4	0.20	0.17	- 0.03	0.24	+ 0.27
5	0.27	0.15	- 0.12	0.22	+ 0.34
3	0.18	0.21	+ 0.03	0.21	+ 0.18
6	0.18	0.15	- 0.03	0.18	+ 0.21
6.5	0.13	0.18	+ 0.05	0.00	- 0.05
7	0.14	0.14	- 0.00	0.17	+ 0.17
7.5	0.14	0.24	+ 0.10	0.22	+ 0.12
8	0.02	0.13	+ 0.11	0.00	- 0.11
9	0.00	0.00	+ 0.00	0.00	+ 0.00
9.5	0.10	0.08	- 0.03	0.00	+ 0.03
10	0.00	0.17	+ 0.17	0.00	- 0.17
11	0.00	0.45	+ 0.45	0.00	- 0.45
11.5	0.05	0.30	+ 0.25	0.05	- 0.20
12	0.12	0.38	+ 0.25	0.11	- 0.15
12.5	0.16	0.28	+ 0.12	0.20	+ 0.08
13	0.20	0.70	+ 0.50	0.07	- 0.43
14	0.18	0.23	+ 0.04	0.12	+ 0.08
14.5	0.23	0.27	+ 0.03	0.24	+ 0.21
z3	0.24	0.00	- 0.24	0.20	+ 0.45
Moyenne (m)	**0.135**	**0.216**	**+ 0.081**	**0.123**	**- 0.012**

En considérant une distance de 1360 ml entre le pont Borely et la vanne barrage et une largeur moyenne du lit de 7,5 m, ces chiffres permettent d'estimer l'évolution du volume de sédiments sur la partie amont de l'Huveaune.

Tableau 5 : Evolution du volume de sédiments sur la partie amont de l'Huveaune

	févr-15	juin-15	Evolution juin 2015 / fév 2015	avr-18	Evolution avr 2018/ fév 2015
Epaisseur (m)	0.13	0.22	+ 0.08	0.12	- 0.01
Surface (m^2)	10 200	10 200		10 200	
Volume (m^3)	1 376	2 200	+ 824	1 250	- 126

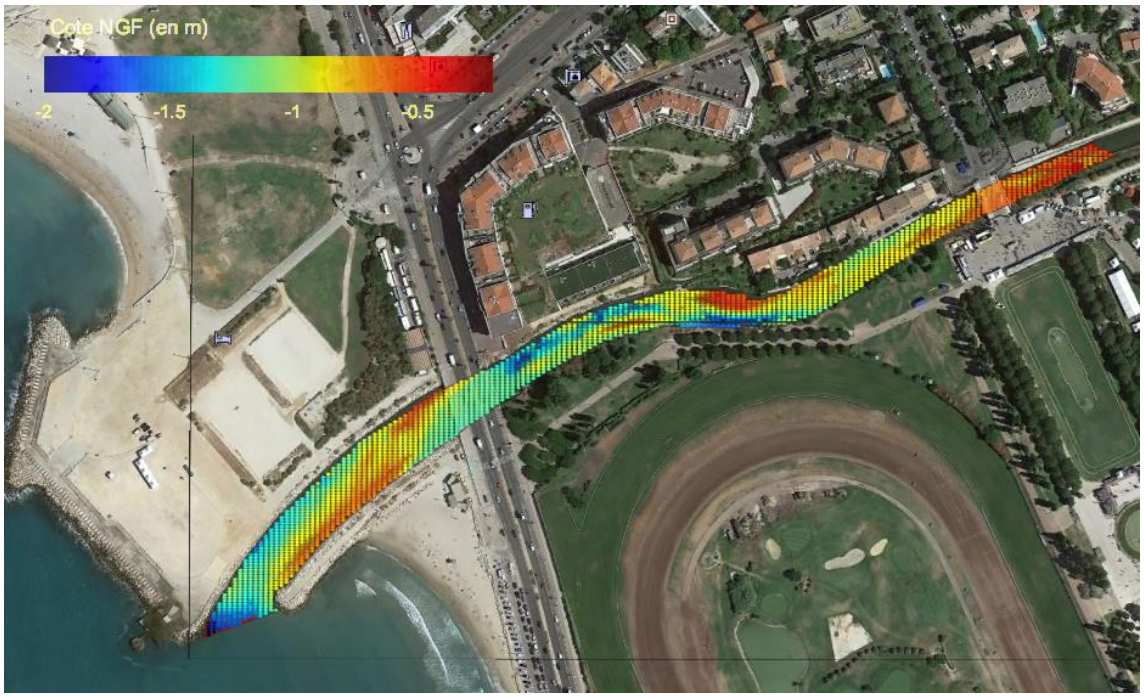
On observe une stabilité sur le long terme du volume de sédiments sur l'amont de l'Huveaune avec tout de même des variations entre les évènements.

3.2.1.3 AVAL : RESULTATS DES CAMPAGNES BATHYMETRIQUES

Campagne de mesures de février 2015

La première campagne bathymétrique a été effectuée en février 2015 et sert de référence pour comparaison avec les deux autres campagnes. Sur la figure suivante, on peut voir l'interpolation des mesures effectuées sur la partie aval de la rivière.

Figure 11: Interpolation des mesures bathymétriques (cote NGF) sur la partie aval du lit de l'Huveaune pour la campagne de février 2015.

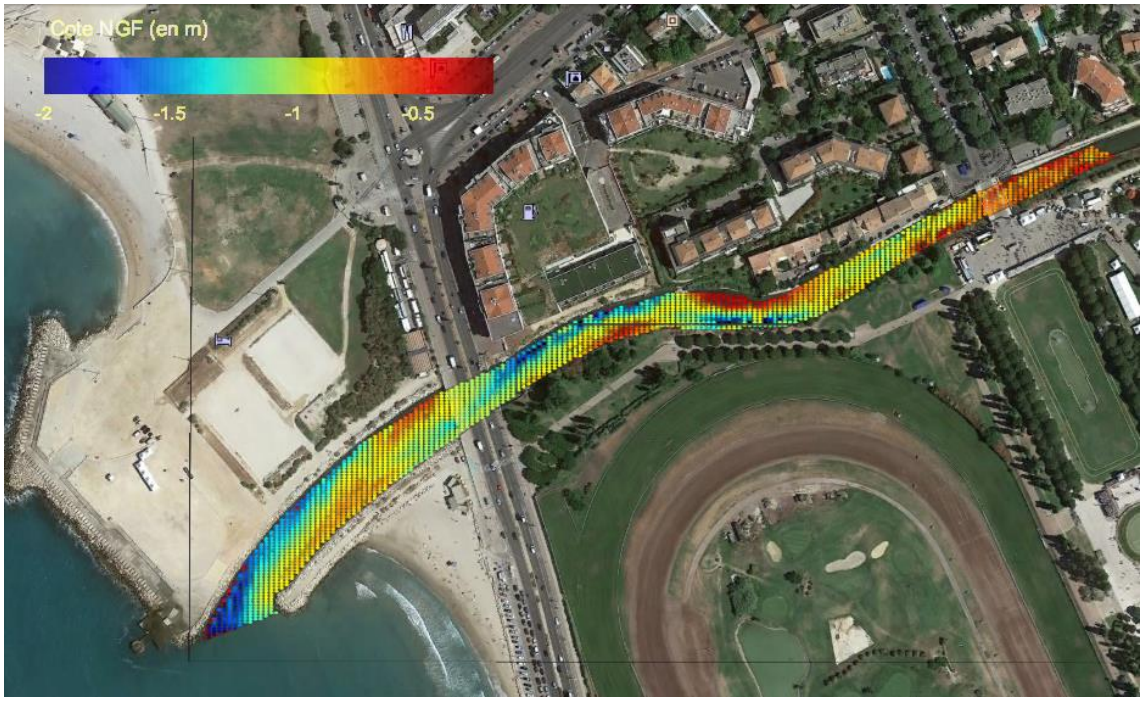


On constate que le fond de la rivière est loin d'être régulier, avec notamment la présence de zones d'accumulation et de zones d'érosion.

Campagne de mesure de juillet 2015

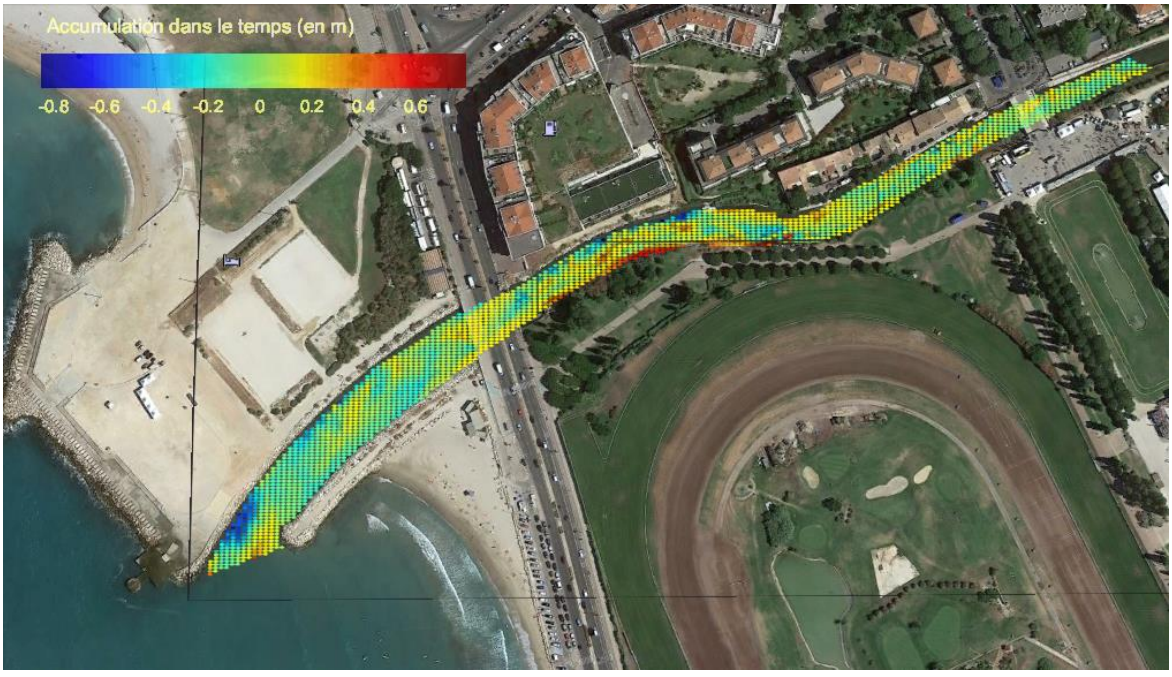
Cette campagne de mesures fait suite à un épisode pluvieux significatif qui a conduit à la reprise du cours naturel de l'Huveaune. L'intérêt de ces nouvelles mesures est alors de voir si un tel épisode est capable de générer une érosion majeure du lit de l'Huveaune sur sa partie aval. Un tel phénomène impliquerait la mise en suspension de nombreux sédiments qui constituent un réservoir potentiel de dégradation pour la plage de l'Huveaune. Les résultats sont présentés dans la figure qui suit.

Figure 12: Interpolation des mesures bathymétriques (cote NGF) sur la partie aval du lit de l'Huveaune pour la campagne de juillet 2015.



La figure ci-dessous représente la variation entre la campagne de juillet et la campagne février 2015. Une valeur positive implique alors une accumulation de sédiments tandis qu'une valeur négative implique un phénomène d'érosion.

Figure 13 : variation, en mètres, entre la bathymétrie de juillet 2015 et la bathymétrie de février 2015.

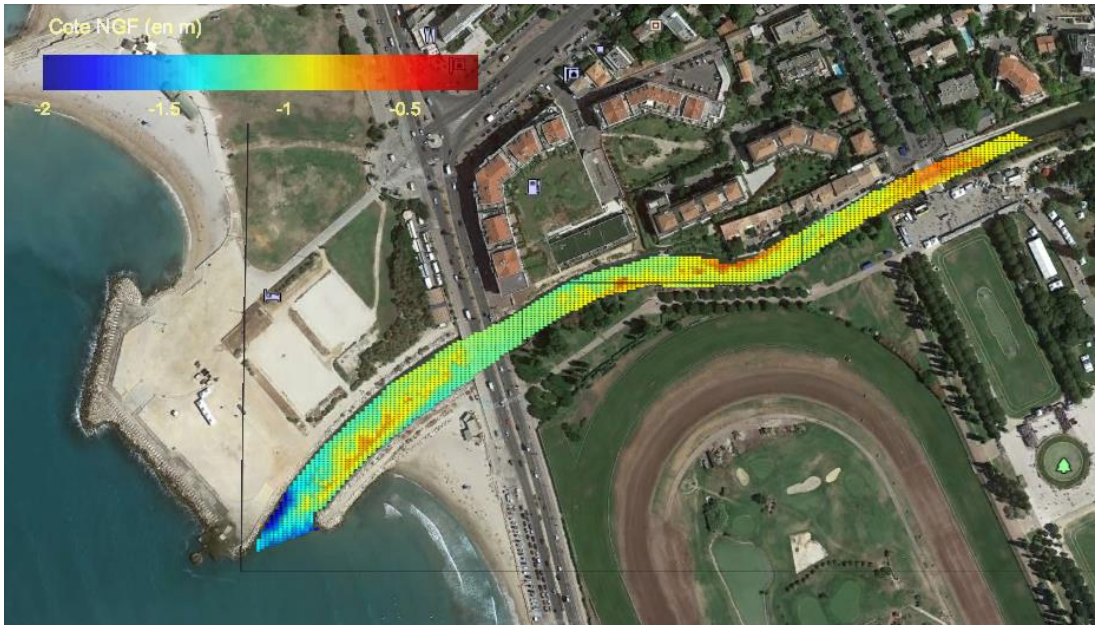


On constate quelques changements dans la répartition des sédiments à l'embouchure de l'Huveaune mais aucune variation du niveau moyen du lit de la rivière. On peut en déduire qu'une reprise du cours naturel de l'Huveaune n'entraîne pas, a priori, une érosion globale du fond de la rivière. Elle pourrait cependant générer la mise en suspension de sédiments, ce qui expliquerait les légères modifications de la morphologie du lit.

Campagne de mesures d'avril 2018

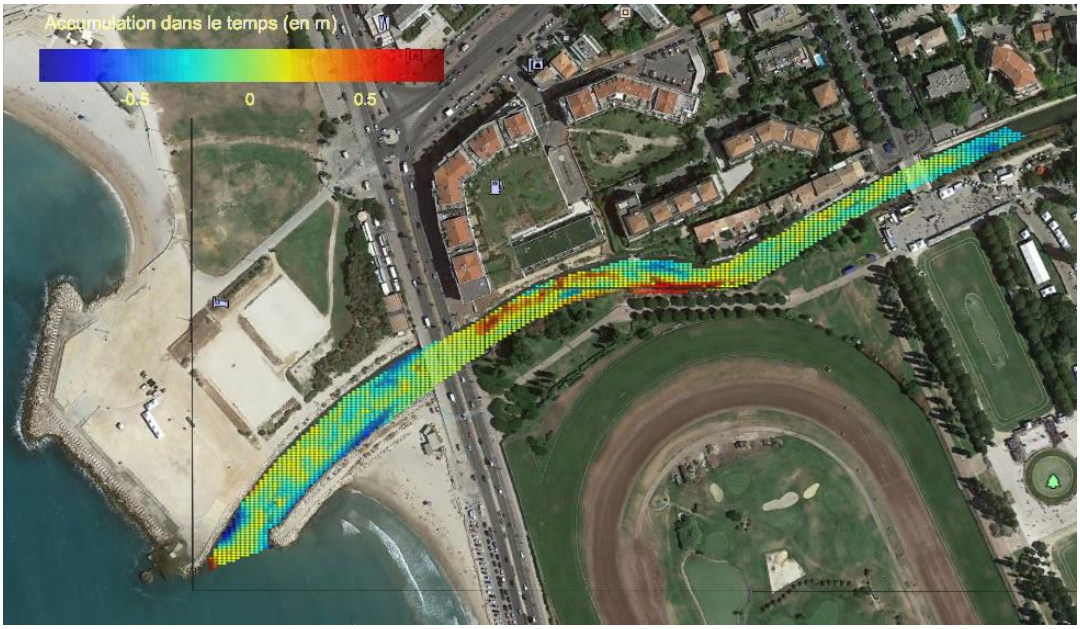
Cette campagne de mesures a été réalisé en fin d'étude, plus de 3 ans après la première campagne. Elle a pour vocation de vérifier s'il existe (ou non) une tendance à l'érosion au niveau l'embouchure de la rivière Huveaune sur le long terme. Les résultats de cette dernière campagne sont présentés sur la figure suivante.

Figure 14: Interpolation des mesures bathymétriques (cote NGF) sur la partie aval du lit de l'Huveaune pour la campagne d'avril 2018.



De la même manière que précédemment, la figure ci-dessous représente la variation entre la campagne d'avril 2018 et la campagne février 2015. Une valeur positive implique alors une accumulation de sédiments tandis qu'une valeur négative implique un phénomène d'érosion.

Figure 15: variation, en mètres, entre la bathymétrie d'avril 2018 et la bathymétrie de février 2015.



Les modifications de la morphologie du lit de la rivière sont sensiblement plus visibles que sur la précédente comparaison. En revanche, on n'observe toujours aucune variation du niveau moyen du fond et il ne semble donc pas qu'il y ait de tendance à l'érosion de la rivière Huveaune sur le long terme.

3.2.2 Caractérisation de la charge bactérienne des sédiments

3.2.2.1 MÉTHODOLOGIE

A l'issue du traitement des données topographiques, des prélèvements et des analyses bactériologiques ont été effectués dans les zones d'accumulation préférentielle de sédiments (i.e., les zones où la hauteur de sédiments accumulés est la plus importante).

Les prélèvements de sédiments ont été effectués en triplicat pour chaque point à l'aide d'une benne à sédiments de type Van Venn, adaptée à une large gamme de sédiments de type sablo-graveleux.

Ainsi les sédiments présents au niveau des profils P2, P3, P4, P5, P13, P14 et P14,5 ont été prélevés. Un prélèvement supplémentaire a par ailleurs été effectué dans une zone d'atterrissement Z3 repérée lors de la première campagne de terrain et située entre les profils P5 et P6 (Figure 16).

Figure 16 : Points de prélèvement des sédiments dans le lit de l'Huveaune



3.2.2.2 RESULTATS

Les résultats des analyses bactériologiques sont présentés dans le ***Tableau 6*** suivant :

Tableau 6 : Caractéristiques bactériologiques des sédiments dans les zones d'accumulation du lit de l'Huveaune

Nom Profil	E. coli (NPP/m^3 de sédiments)	Entérocoques (NPP/m^3 de sédiments)
P2	6.26E+08	4.32E+07
P3	1.07E+08	1.80E+07
P4	6.00E+07	8.90E+06
P5	1.02E+07	1.49E+06
P13	1.90E+08	4.64E+07
P14	1.37E+07	1.41E+07
z3	1.06E+08	1.64E+07
Moyenne	**1.59E+08**	**2.12E+07**

L'ensemble des sédiments échantillonnés dans les zones d'accumulation présente des concentrations bactériennes en *E. coli* et en Entérocoques fécaux comprises entre 1. 10^7 et 6,3.10^8 NPP/m^3 pour les E. coli et 1,5.10^6 et 4,6.10^7 NPP/m^3 pour les Entérocoques fécaux. Ces concentrations sont globalement assez homogènes et permettent de calculer les concentrations moyennes suivantes :

- E. coli : 1,6.10^8 NPP/m^3 de sédiment,
- Entérocoques : 2,1.10^7 NPP/m^3 de sédiment.

A titre de comparaison, la charge contenue dans 1 m^3 de sédiments est équivalente à celle contenue dans 0,1 l d'eau usée.

Sur cette base, un ordre de grandeur de la charge en bactéries présente dans les sédiments en amont a été réalisée (***Tableau 7)***.

Tableau 7 : Charge bactérienne des sédiments dans les zones d'accumulation du lit de l'Huveaune

	févr.-15	**juin-15**	**avr.-18**
Volume de sédiments (m3)	1376	2200	824
Concentration en E. coli (NPP/m^3 de sédiments)	1.59E+08	1.59E+08	1.59E+08
Charge en E. Coli (NPP)	**2.19E+11**	**3.50E+11**	**1.31E+11**
Concentration en Entérocoques (NPP/m^3 de sédiments)	2.12E+07	2.12E+07	2.12E+07
Charge en Entérocoques (NPP)	**2.92E+10**	**4.67E+10**	**1.75E+10**

L'ensemble des sédiments situés à l'amont de l'Huveaune représente donc l'équivalent de :

- 2 journées de rejet en bactéries de l'exutoire identifié comme étant le plus critique (N°30 : E. coli et Entérocoques fécaux = 2,8 10^{10} NPP/jour).
- 50 l d'eaux usées.

En conclusion, on note que même si l'ensemble de ces sédiments étaient emportés lors des évènements pluvieux donnant lieu à une reprise de son cours par l'Huveaune, ils ne constitueraient pas un apport significatif en charge bactériologique.

3.3 Examen des nappes d'eau et des résurgences

3.3.1 Méthodologie

Les nappes d'eau ont été identifiées à partir du relevé topographique initial et des visites de terrain.

La méthodologie de relevé des hauteurs d'eau est explicitée dans le paragraphe relatif aux sédiments (cf § 3.2.1.1).

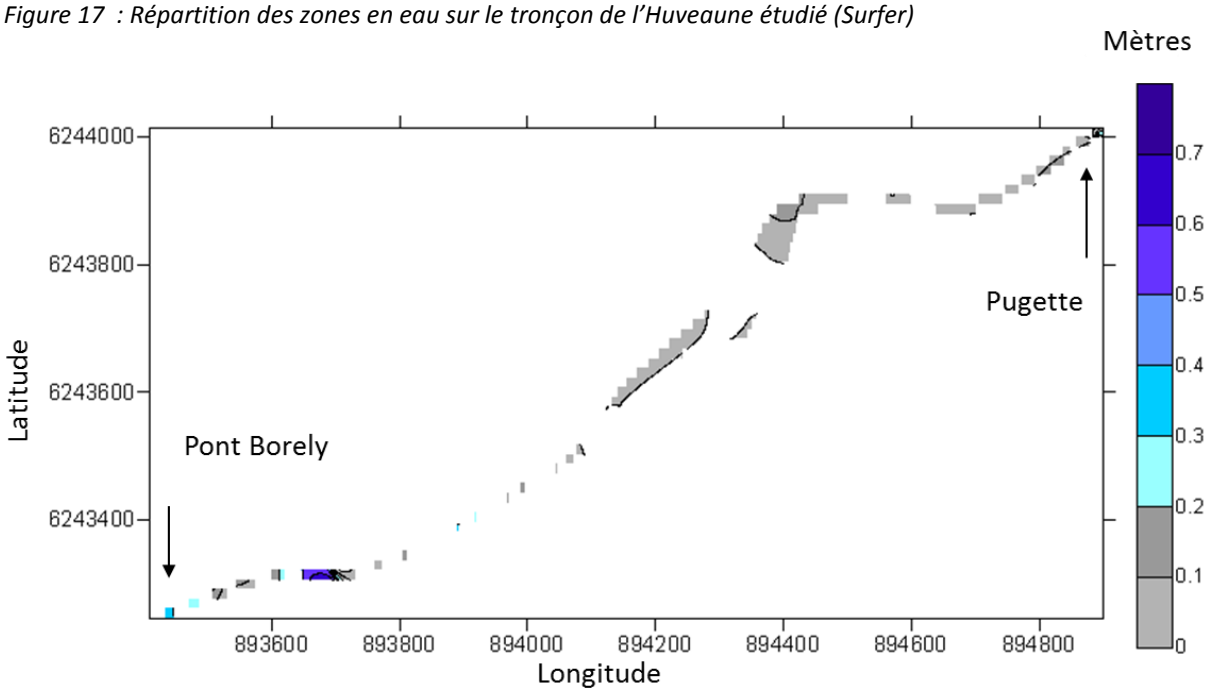
Lors des campagnes, les agents ont :

- estimé le volume en mesurant la longueur, la largeur et la profondeur pour les nappes ou les résurgences ;
- mesuré la température *in situ* de l'eau échantillonnée à l'aide d'un thermomètre ;
- effectué un prélèvement d'eau en veillant à préserver l'échantillon de toute contamination. Les mains ont été décontaminées avant chaque prélèvement en utilisant du gel hydro-alcoolique. Le prélèvement a été effectué à l'aide d'un flacon stérile de 500 ml, et stockés dans une glacière contenant des pains de glace (obscurité, 4°C environ). L'aspect de l'échantillon (clair ou trouble) a également été noté.

3.3.2 Caractérisation des nappes

Les hauteurs d'eau relevées sur la zone d'étude sont comprises entre 0 et 0,71 m, pour une hauteur moyenne de 0,34 m. La représentation cartographique 3D a été réalisée *via* le logiciel Surfer® (*Figure* 17). Les zones présentant les hauteurs d'eau les plus importantes (sur les points relevés) se situent dans la partie aval (profils P7, P5, P4 et P1) et dans la partie amont (profils 14.5, 14) du tronçon de l'Huveaune étudié.

Figure 17 : Répartition des zones en eau sur le tronçon de l'Huveaune étudié (Surfer)



Au total, 10 nappes d'eau ont été répertoriées dans le lit de l'Huveaune entre le site de la Pugette et l'embouchure. La zone en eau de mer n'a pas été considérée, celle-ci étant étudiée dans le cadre des campagnes océanographiques. L'ensemble des observations a été repris dans une fiche de synthèse en Annexe 4.

La localisation et les dimensions des nappes inventoriées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Description des nappes d'eau présentes dans le lit de l'Huveaune

N° de la nappe d'eau	Coordonnées géographiques				Longueur (m)	Largeur moyenne (m)	Profondeur moyenne (m)	Volume (m^3)
	Amont		Aval					
Nappe N°1	43°15'49.87"N	5°23'17.84"E	43°15'47.32"N	5°23'11.69"E	160	4	0,3	192
Nappe N°2	43°15'50.26"N	5°23'18.72"E	43°15'49.97"N	5°23'18.04"E	18	1	0,15	2,7
Nappe N°3	43°15'52.64"N	5°23'22.27"E	43°15'50.47"N	5°23'19.03"E	5	2	0,5	5
Nappe N°4	43°15'50.57"N	5°23'19.22"E	43°15'50.24"N	5°23'19.09"E	20	1,5	0,1	3
Nappe N°5	43°15'52.34"N	5°23'22.21"E	43°15'50.57"N	5°23'19.22"E	95	4,5	0,45	192
Nappe N°6	43°15'55.39"N	5°23'24.98"E	43°15'54.44"N	5°23'24.08"E	35	4	0,5	70
Nappe N°7	43°16'3.46"N	5°23'37.58"E	43°16'3.23"N	5°23'35.89"E	25	30	0,15	56
Nappe N°8	43°16'2.76"N	5°23'48.20"E	43°16'3.55"N	5°23'44.27"E	25/100	3,5/1	0,15/0,05	18
Nappe N°9	43°16'3.95"N	5°23'50.46"E	43°16'3.66"N	5°23'48.19"E	50	4	0,3	60
Nappe N°10	43°16'7.77"N	5°23'59.70"E	43°16'6.06"N	5°23'56.99"E	15 à 80	3 à 26	0,4 à 1	~600

Parmi ces nappes d'eau, certaines sont temporaires, d'autres permanentes. Certaines sont générées par le déversement d'exutoires et d'autres sont générées par l'affleurement de la nappe phréatique.

D'après nos observations, nous avons classé les nappes d'eau selon leur état et leur origine. Les résultats préliminaires sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 9 : Etat et origine des nappes d'eau observées lors de la campagne

	ETAT		Origine	
N° de la nappe d'eau permanente	**Temporaire**	**Permanente**	**Ecoulement par temps sec OU résidu de la dernière pluie**	**Affleurement de la nappe phréatique**
Nappe N°1		X		X
Nappe N°2		X		X
Nappe N°3		X		X
Nappe N°4		X		X
Nappe N°5		X		X
Nappe N°6		X		X
Nappe N°7	X		X	
Nappe N°8	X		X	
Nappe N°9	X		X	
Nappe N°10		X	X	

Les caractéristiques bactériologiques (*E. coli* et Entérocoques fécaux) des nappes d'eau ont été quantifiées et sont présentées dans le tableau suivant :

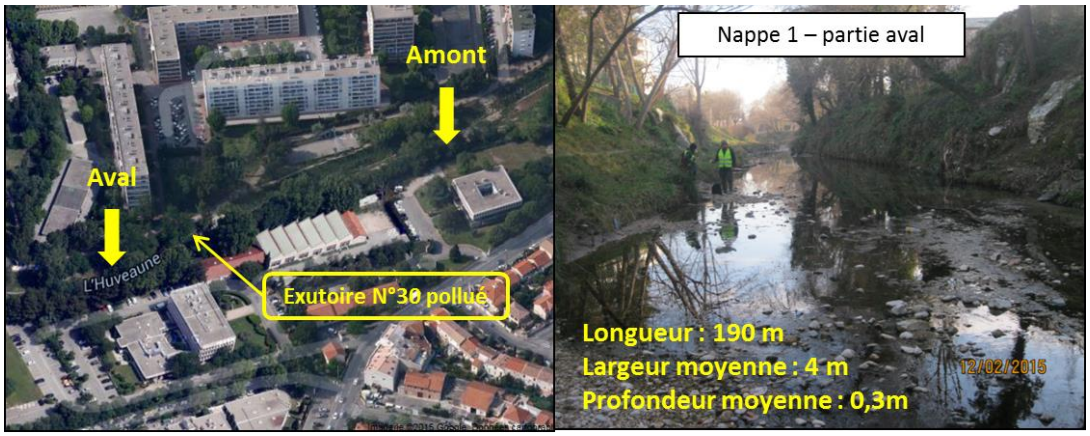
Tableau 10 : Caractéristiques bactériologiques des nappes d'eau observées lors de la campagne

	Volume (m^3)	Qualité bactériologique		Charge bactériologique	
		Escherichia Coli **(NPP/100 mL)**	**Entérocoques fécaux (NPP/100 mL)**	***Escherichia Coli*** **(NPP)**	**Entérocoques fécaux (NPP)**
Nappe N°1	192	4.1E+05	3.4E+04	7.8E+11	6.4E+10
Nappe N°2	2.7	300	<40	8.1E+06	-
Nappe N°3	5	120	<40	6.0E+06	-
Nappe N°4	3	80	<40	2.4E+06	-
Nappe N°5	192	120	400	2.3E+08	7.7E+08
Nappe N°6	70	250	410	1.8E+08	2.9E+08
Nappe N°7	56	470	160	2.6E+08	9.0E+07
Nappe N°8	18	640	40	1.2E+08	7.2E+06
Nappe N°9	60	<40	<40	-	-
Nappe N°10	600	530	410	3.2E+09	2.5E+09
Total				7.8E+11	6.8E+10
Total hors nappe N°1				4.0E+09	3.6E+09

Les résultats d'analyses bactériologiques (*E. coli* et Entérocoques fécaux) indiquent :

- la présence d'une pollution sanitaire modérée au niveau des Nappes 2,3,5,6,7,8 et 10 dont la concentration est inférieure à 700 NPP/100 ml,
- la présence d'une contamination sanitaire plus importante, de l'ordre de 4.10^5 NPP/100 ml pour E. coli et $33,4.10^4$ NPP/100 ml pour les Entérocoques fécaux, dans la partie aval de la Nappe 1. Cette pollution est très liée à la présence de l'exutoire N°30 qui déverse quotidiennement un flux bactérien supérieur à $2,8.10^{10}$ NPP pour les deux paramètres (Figure 18).

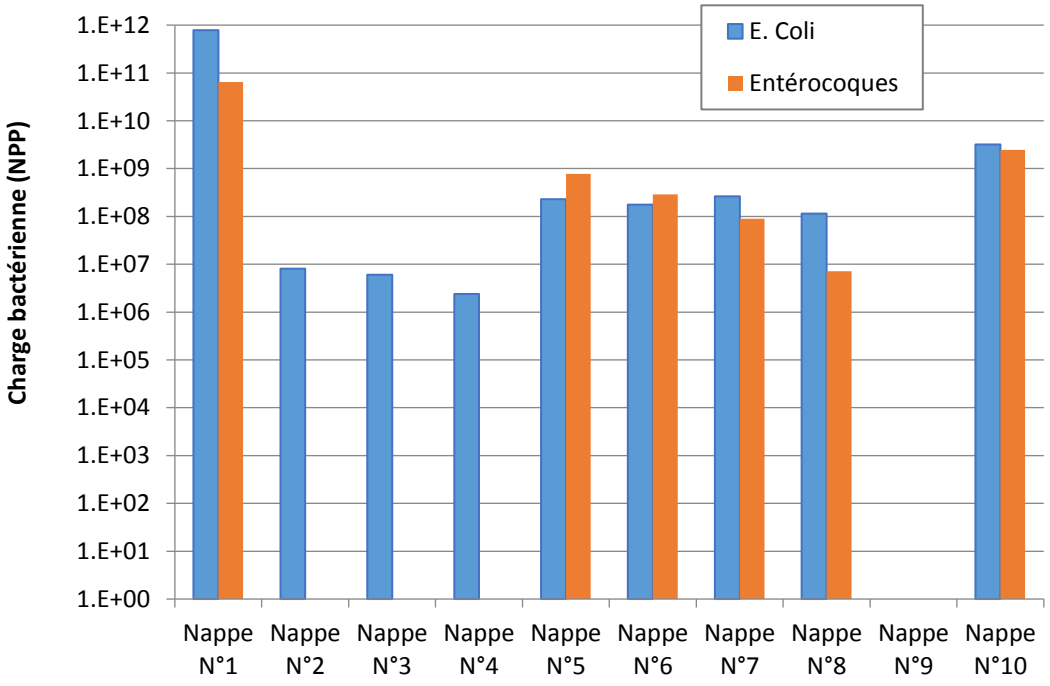
Figure 18 : Caractéristiques de la Nappe N°1 et localisation de l'Exutoire N°30 pollué



La partie amont de la Nappe 1 ainsi que les Nappes 4 et 9 ne présentent pas de contamination sanitaire.

Le volume et la concentration en *Escherichia coli* et en Entérocoques fécaux permettent de calculer une charge bactérienne pour chacune des nappes d'eau observées. Cette dernière est présentée dans le graphique ci-dessous (Figure 19) :

Figure 19 : Charges bactériennes caractérisant les nappes d'eau observées lors de la campagne



En dehors de la nappe contaminée par le rejet de l'exutoire n°30, les nappes ne représente qu'un faible réservoir de bactéries, équivalent à 4 l d'eaux usées dans sa globalité.

3.4 Dynamique bactériologique au niveau de l'embouchure de l'Huveaune

3.4.1 Périmètre de la zone d'étude et maillage de la zone de baignade

Afin d'étudier les phénomènes de persistance de la pollution préférentiellement sur la plage de l'Huveaune, il est nécessaire d'échantillonner à haute fréquence les sources de pollution et les plages du linéaire côtier à l'embouchure. En effet il est important de comprendre si les causes de pollution de la plage proviennent :

- de sources continues pendant la durée de l'évènement polluant, présentes même après la pluie et situées dans le bras de l'Huveaune entre la vanne de la Pugette et l'embouchure (surverses prolongées, écoulements naturels, nappe, résurgence, …) ;
- et/ ou de phénomènes de retour de panache polluant sur les plages plus à l'aval en mer, notamment sur la plage de l'Huveaune.

Dans le cadre de cette étude, les campagnes se sont concentrées sur la bordure littorale et l'Huveaune afin d'identifier les mécanismes qui entraînent la persistance de la contamination bactériologique des eaux de baignade de la plage de l'Huveaune. L'objectif du maillage est de caractériser la dynamique bactériologique et physico-chimique :

- des apports : rivières (points verts) et réseau (points rouges), déversoir du Prado
- des eaux de baignade locales : plages (points bleus) et mer (proche plage Huveaune).

Le maillage est présenté sur la Figure 20 :

Figure 20 : Représentation des points de prélèvement lors d'une campagne d'analyse



Les points de prélèvement correspondent à :

1 - Rivière Huveaune : Barrage de la Pugette (non représenté sur la carte)
2 – Parc Borely : surverse dans l'Huveaune
3 et 4 – Réseau : eaux résiduelles au droit de l'exutoire du DO Prado
5 - Rivière Bonneveine : Poste de relevage de Hambourg
6 - Rivière Huveaune : Pont Avenue du Parc Borely
7 - Rivière Huveaune : Pont Mendes France
8 - Plage Huveaune : Point de prélèvement ARS
9 - Plage Huveaune Sud
10 - Plage Prado Sud : Point de prélèvement ARS
11 - Plage Borely : à proximité de l'exutoire du ruisseau de Bonneveine
12 - Plage Bonneveine : Point de prélèvement ARS
13 – Mer : aux abords de la plage de l'Huveaune
14 – Mer : au large de la plage de l'Huveaune

Le point P1, situé en amont au niveau de la vanne de la Pugette est nécessaire pour évaluer, sur les aspects liés à la bactériologie et aux MES :

- la contribution amont lorsque la vanne est ouverte et que les écoulements sont dirigés vers l'embouchure,
- le bruit de fond de la rivière en temps sec (vanne fermée) même si les écoulements sont dirigés vers l'émissaire.

Les points P2 à P5 sont nécessaires pour évaluer les rôles potentiels des sources de pollution « Lac Borely », « Eaux résiduelles du déversoir d'orage du Prado » et « Ruisseau Bonneveine » dans la persistance des épisodes de dégradation.

Les points P6 et P7 sont nécessaires pour évaluer la dynamique de contamination des eaux estuariennes de l'embouchure de l'Huveaune.

Les points P8 à P14 sont nécessaires pour mesurer, quantifier et caractériser la dynamique de contamination des eaux littorales du secteur, et en particulier de la zone de baignade de l'Huveaune.

3.4.2 Déroulement des campagnes

Afin de caractériser la dynamique physico-chimique et bactériologique de l'embouchure et de la plage de l'Huveaune par temps sec, une première campagne sur le maillage présenté ci-dessus a été mise en œuvre le 13 avril 2015, lors d'une journée de temps sec. Elle vise à établir une référence pour comparaison avec les campagnes par temps de pluie.

Cette même dynamique a également été caractérisée à la suite d'épisodes pluvieux significatifs. Pour cela, et parce que chaque épisode pluvieux est un cas particulier, quatre campagnes ont été réalisées par temps de pluie avec déversement au niveau de la vanne-barrage de la Pugette (reprise du lit de l'Huveaune). Les conditions météorologiques ont permis de réaliser quatre campagnes : en juin et septembre 2015, en octobre 2016 et en novembre 2017. Ces campagnes ont été déclenchées quelques heures après l'abaissement de la vanne barrage de la Pugette. Les deux premières campagnes ont duré 4 jours, à raison de 2 tournées par jour et les 2 suivantes ont été rallongées à 8 et 5 jours après une adaptation du protocole.

Pour chacun des quatre épisodes pluvieux, les paramètres suivants sont suivis :

- Intensité et cumul de pluie mesurés par le pluviomètre de Vernet,
- Fonctionnement des principaux ouvrages du secteur : vanne de la Pugette, déversoir d'orage du Prado, etc…
- Qualité bactériologique et physico-chimique (salinité et MES) sur l'ensemble des points du maillage lors de chaque tournée de prélèvement,

- Conditions océano-météorologiques : Régime de vent, vagues et niveau d'eau (prévisions et/ou observations locales, en fonction des données disponibles), température de l'air et de l'eau (prévisions et/ou observations locales, en fonction des données disponibles).

3.4.3 Paramètres mesurés

3.4.3.1 MESURE DE LA SALINITÉ DE L'EAU

La salinité des échantillons d'eau sera mesurée au laboratoire du SERAM à l'aide d'une sonde multi-paramètres Hanna Instruments. Cette mesure est mise en œuvre uniquement après les analyses bactériologiques de manière à ne pas contaminer les échantillons.

3.4.3.2 QUANTIFICATION DES MATIÈRES EN SUSPENSION

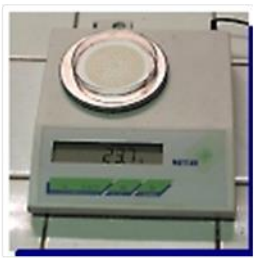
La quantification des matières en suspension (MES) présentes dans les échantillons d'eau sera effectuée au laboratoire de la société SERAMM. Les MES correspondent au poids sec du résidu obtenu après filtration de l'échantillon d'eau et séchage à l'étuve à 105 °C.

Protocole :

- une première étape de filtration de l'échantillon permet de récupérer l'ensemble des particules sur un filtre, préalablement pesé sur une balance de précision;
- Le filtre est ensuite mis à sécher dans une étuve à 105°C pendant 1h et mis à refroidir dans un dessiccateur ;
- Le filtre est ensuite pesé.

Figure 21 : de gauche à droite : système de filtration - Dessiccateur - Balance de précision





La quantité de MES est donnée par la différence entre le poids initial du filtre et le poids après filtration et séchage, rapporté au volume de l'échantillon filtré.

3.4.3.3 QUANTIFICATION DE LA CHARGE BACTÉRIENNE

La recherche d'une contamination sanitaire dans les échantillons d'eau issus des exutoires, des nappes et des résurgences a été immédiatement effectuée en quantifiant les deux indicateurs de contamination sanitaire, *Escherichia coli* et les Entérocoques fécaux. Ces analyses ont été mises en œuvre selon les méthodes de culture normalisées (NF-EN-ISO 9308-3 et NF-EN-ISO 7899-1) dont le principe et la méthode sont rappelés en Annexe 5.

La caractérisation bactériologique des sédiments a été effectuée sur un échantillon moyen (reconstitué à partir des triplicats) selon les mêmes méthodes. Au préalable et suivant le type d'échantillon collecté, une phase préalable à l'analyse a consisté à « décrocher » les bactéries des particules sédimentaires (mélange au vortex pendant 10 minutes) afin de les remettre en suspension dans l'eau interstitielle. C'est cette dernière qui a été analysée.

3.4.4 Mesures bactériologiques et physico-chimiques par temps sec

La campagne de prélèvement par temps sec a été mise en œuvre le 13 avril 2015 entre 7h et 10h. Les conditions météorologiques étaient les suivantes : soleil, absence de vent, 14 à 17 degrés durant la campagne de prélèvement des échantillons d'eau. Les résultats des analyses effectuées sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Résultats des analyses effectuées le 13/04/15

POINTS DE PRELEVEMENTS	Salinté (‰)	MES (mg/L)	BACTERIO EC (NPP/100ML)	BACTERIO EN (NPP/100ML)
1 - Amont du barrage de la Pugette	0,0	2,5	1860	6500
2 - Parc Borely : surverse dans l'Huveaune	0,2	<2	160	15
3 - Réseau : eaux résiduelles dans la canalisation du déversoir d'orage du Prado, exutoire dans Huveaune	31,0	<2	861	<15
4 - Réseau : eaux résiduelles dans la canalisation du déversoir d'orage du Prado, exutoire en mer	34,4	2,0	15	<15
5 - Rivière Bonneveine : Poste Hambourg, vers STEP	0,3	<2	70400	62200
6 - Rivière Huveaune : Pont Avenue du Parc Borely	2,7	<2	77	15
7 - Rivière Huveaune : Pont Mendes France	27,0	<2	161	46
8 - Plage Huveaune (point ARS)	38,4	2,6	<15	<15
9 - Plage Huveaune Sud	37,1	3,0	<15	<15
10 - Plage Prado Sud (point ARS)	36,2	2,2	<15	<15
11 - Plage Borely, à proximité de l'exutoire du ruisseau de Bonneveine	36,5	2,3	<15	<15
12 - Plage Bonneveine (point ARS)	37,6	<2	<15	<15
13 – Mer : aux abords de la plage de l'Huveaune	37,6	<2	77	15
14 – Mer : au large de la plage de l'Huveaune	38,4	<2	<15	<15

Au regard de ces résultats, les éléments suivants peuvent être relevés :

- Le prélèvement effectué dans l'Huveaune en amont de la vanne de la Pugette (cours d'eau détourné vers Cortiou) présente une faible quantité de MES. Concernant la charge bactérienne, les gammes de concentrations mesurées sont proches des valeurs habituellement observées lors des campagnes de recherche de pollution réalisées par SERAMM. On notera que la concentration en E. Coli est proche du seuil de conformité fixé par l'AFFSET pour une eau douce (1 800 NPP/ml).
- La surverse du lac du Parc Borely ne présente pas de contamination particulière. La charge particulaire est très faible, inférieure au seuil de détection.
- Les deux exutoires du déversoir d'orage du Prado (réseau unitaire) ne sont pas particulièrement chargés. Seul le point 3 indique la présence d'*E. coli*. La concentration reste néanmoins inférieure au seuil de qualité pour un échantillon ponctuel selon la directive 2006/7/CE (Qualité des eaux de baignade, 1000 bact./100 ml). Les deux ouvrages sont en eau de mer et présentent une charge particulaire très faible.
- Le ruisseau de Bonneveine est détourné par temps sec vers la station d'épuration. Les eaux potentiellement contaminées n'atteignent pas la plage de Borely. Lors de la campagne, le point de prélèvement ne présentait pas d'écoulement, il est situé en aval de la murette qui fait office de déversoir d'orage. Nous avons donc prélevé dans la partie en eau du ruisseau afin d'avoir une idée de sa charge bactérienne. Cette dernière est de l'ordre de 7.10^4 NPP/100 ml pour *E. Coli* et 6.10^4 NPP/100 ml pour les Entérocoques fécaux.
- Les points 6 et 7, situés juste en amont de l'embouchure de l'Huveaune, indiquent que la charge bactérienne est très faible voire inexistante pour les deux sites. Au niveau du pont du

parc Borely, le plan d'eau est constitué majoritairement d'eau douce alors que le plan d'eau au niveau du pont de l'avenue Mendès France est plutôt constitué d'eau de mer. La charge particulaire des deux échantillons est inférieure au seuil de détection.

- Les points 8 à 14 sont situés en mer, entre la plage de Prado Sud et Bonneveine. Ils présentent des concentrations en MES très faibles, aux environs de 2 mg/l. Les échantillons prélevés ne présentaient pas de pollution bactériologique.

La campagne d'analyse bactériologique effectuée le 13 avril 2015 par temps sec montre que le plan d'eau à l'embouchure de l'Huveaune est de bonne qualité bactériologique. Seul l'exutoire du déversoir d'orage du Prado, côté Huveaune, présente un fond de pollution sur le paramètre *E. coli*. Les rivières Huveaune et notamment Bonneveine présentent quant à elles une charge bactérienne importante. Des campagnes de recherches de pollution sont réalisées périodiquement par le délégataire pour identifier et résorber les sources de pollution.

3.4.5 Mesures bactériologiques et physico-chimiques par temps de pluie

3.4.5.1 DESCRIPTION DES ÉPISODES PLUVIEUX ET DES DEVERSEMENTS ASSOCIES

Les épisodes pluvieux qui ont donné lieu aux campagnes de mesures présentent des caractéristiques très variées. Le tableau ci-dessous propose une description globale de ces évènements.

Tableau 12 : Caractérisation des épisodes pluvieux (basée sur les données de la station Marseille-Corniche du réseau StatIC)

	12/06/2015	13/09/2015	14/10/2016	05/11/2017
Cumul (mm)	~ 60	~ 50	~ 10 le 14 ~ 10 le 17	~ 45
Intensité Max (mm/h)	36,8	57	8,8 le 14 5,6 le 17	17,6
Horaires	De 19h à 22h	De 6h30 à 7h30	Le 14 de 5h30 à 7h Le 17 de 17h à 18h30	De 1h à 5h

Ces épisodes pluvieux ont entraîné des déversements :

- De l'Huveaune qui a repris son cours naturel jusqu'à la plage éponyme ;
- Du ruisseau de Bonneveine qui a repris son cours naturel jusqu'à la plage de Borely ;
- Du déversoir d'orage du Prado sur le réseau unitaire dont les exutoires sont situés à l'embouchure de l'Huveaune (sauf campagne d'octobre 2016) ;
- De la station de relevage de la Muette dont les effluents sanitaires déversés empruntent le DO du Prado (sauf campagnes d'octobre 2016 et de novembre 2017).

Les volumes ainsi que les charges bactériennes (issues de concentrations bactériologiques moyennes théoriques) déversés lors des quatre épisodes pluvieux sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Caractérisation des déversements associés aux épisodes pluvieux

	12/06/2015	13/09/2015	14/10/2016	05/11/2017
Rejets (m^3)				
Rivière Huveaune	800 000	354 000	98 000 (le 14/10) 42 000 (le 17/10)	1 341 000
Ruisseau Bonneveine	33 000	25 000	7 000 (le 14/10) 5 000 (le 17/10)	22 000
DO Prado	80 000	50 000	0	14 000
SPG Muette	2 100	1 400	0	0
Charges bactériennes estimées ($_x10^{12}$ NPP)				
Rivière Huveaune (2.6E5 NPP/100 ml)	2 080	920	364	3 487
Ruisseau Bonneveine (~10E5 NPP/100 ml)	35	25	12	22
DO Prado (~10E7 NPP/100 ml)	8 000	5 000	0	1 400
SPG Muette (~10E8 NPP/100 ml)	2 100	1400	0	0

NB : Les charges bactériennes présentées sont issues des concentrations moyennes observées lors de multiples campagnes réalisées ces dernières années.

Les Figure 22 et Figure 23 présentées ci-dessous permettent de classer les différentes sources au cours de chaque épisode.

Figure 22 : Répartition des rejets en termes de volume

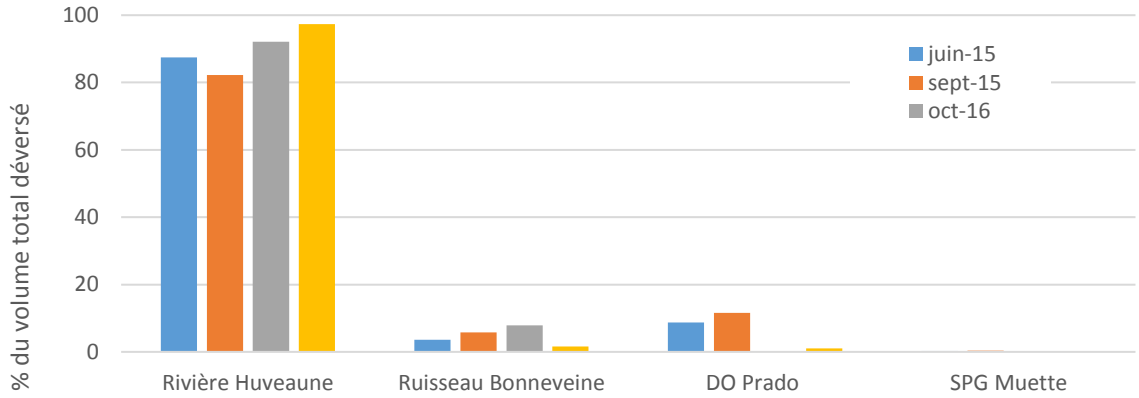
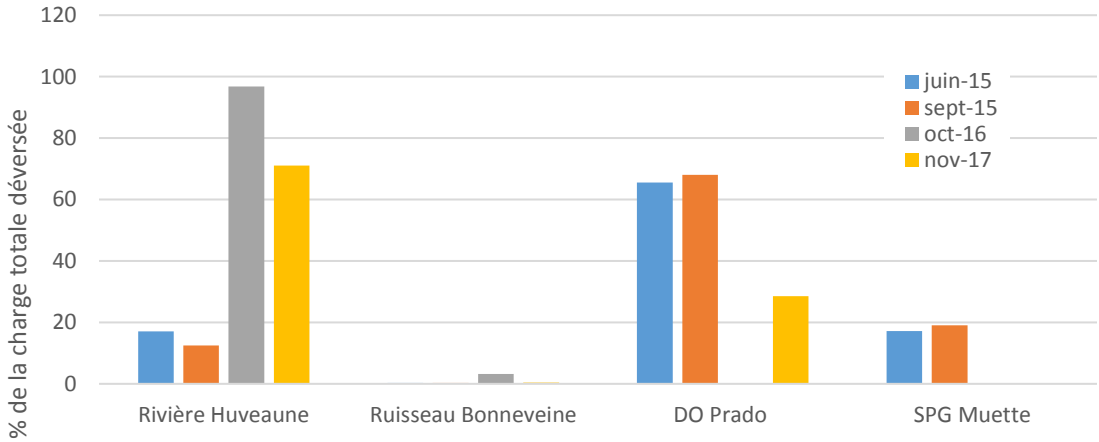


Figure 23 : Répartition des rejets en termes de charge bactériologique



On constate que la rivière Huveaune est de loin la source principale en termes de volume, et ce quel que soit l'épisode, alors que ceci n'est pas forcément le cas si l'on se concentre sur l'estimation de la charge bactériologique. On s'aperçoit en effet que les contributions en termes de charge varient énormément d'un évènement à l'autre. **Dès lors qu'un déversement est observé au niveau du DO Prado, cette source est la principale contributrice. La rivière Huveaune ne prend quant à elle un poids réel qu'en cas d'absence de déversement du DO Prado et/ou de la SPG Muette.**

3.4.5.2 DESCRIPTION DES CAMPAGNES DE MESURES

Les 4 campagnes réalisées entre juin 2015 et novembre 2017 ont permis de caractériser les dynamiques bactériologique et physico-chimique sur les 14 points suivis.

Au cours de l'avancement de l'étude, et après analyse des résultats des premières campagnes, des adaptations des protocoles de mesures ont été faites. Il s'agit par exemple du rallongement des campagnes ou encore de la modification du nombre de tournées par jour. La présentation des différentes campagnes qui suit vient alors détailler ces adaptations :

- Juin 2015 : deux tournées de prélèvements par jour pendant quatre jours sur l'ensemble des points prévus initialement.
- Septembre 2015 : deux tournées de prélèvements par jour pendant quatre jours sur l'ensemble des points prévus initialement.
- Octobre 2016 : huit journées de campagnes. Une tournée le 14 (averses orageuses), deux tournées par jour les 15 et 16, une tournée le 17 (nouvelles averses), deux tournées le 18, et enfin une seule tournée par jour jusqu'au 21. Pour cette campagne, il a été décidé de réaliser les prélèvements du ruisseau de Bonneveine à son exutoire dès lors qu'il ne s'écoulerait plus vers la mer, c'est-à-dire à partir du 15. Aussi, pour ce qui est de la surverse Borely, il a également été décidé de réaliser le prélèvement directement à la source (jet de la surverse) au lieu de continuer à le faire dans la rivière Huveaune au droit de la surverse comme c'était le cas auparavant. Enfin, un nouveau point de prélèvement a été choisi pour cette campagne, il s'agit d'un point situé en amont du décroisement qui sépare le DO Prado entre son exutoire rivière et son exutoire mer. Ces adaptations ont également été appliquées lors de la dernière campagne de novembre 2017.
- Novembre 2017 : 5 jours de mesures avec deux tournées par jour les 5 et 6 et une tournée par jour ensuite. Aucun prélèvement n'a été effectué en mer sur le point le plus au large au cours de cette dernière campagne.

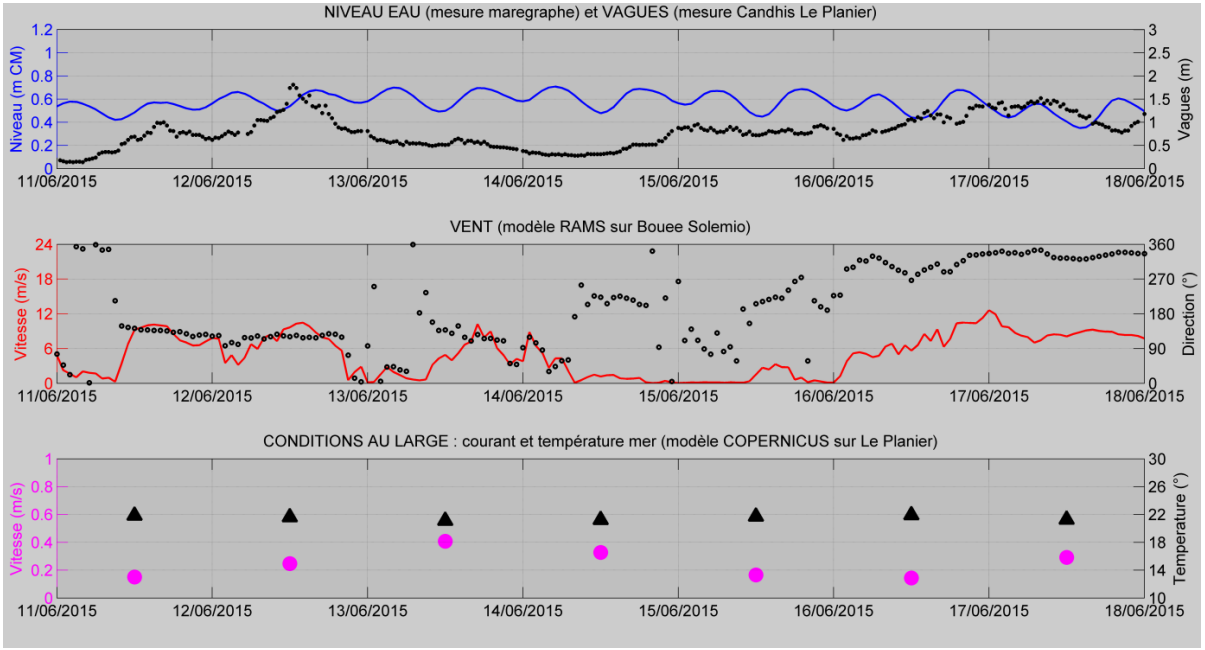
Les résultats des mesures effectuées au cours des quatre campagnes sont détaillés dans les tableaux en annexe 6.

3.4.5.3 DESCRIPTION DES CONDITIONS OCÉANO-MÉTÉOROLOGIQUES PENDANT LES CAMPAGNES DE MESURES

3.4.5.3.1 Juin 2015

L'épisode pluvieux qui a déclenché la campagne de mesures de juin 2015 s'est produit dans la soirée du 12 juin 2015. La campagne a commencé le 13 au matin pour se terminer le 16 au soir (4 jours).

Figure 24 : Conditions océano-météorologiques pendant la campagne de juin 2015

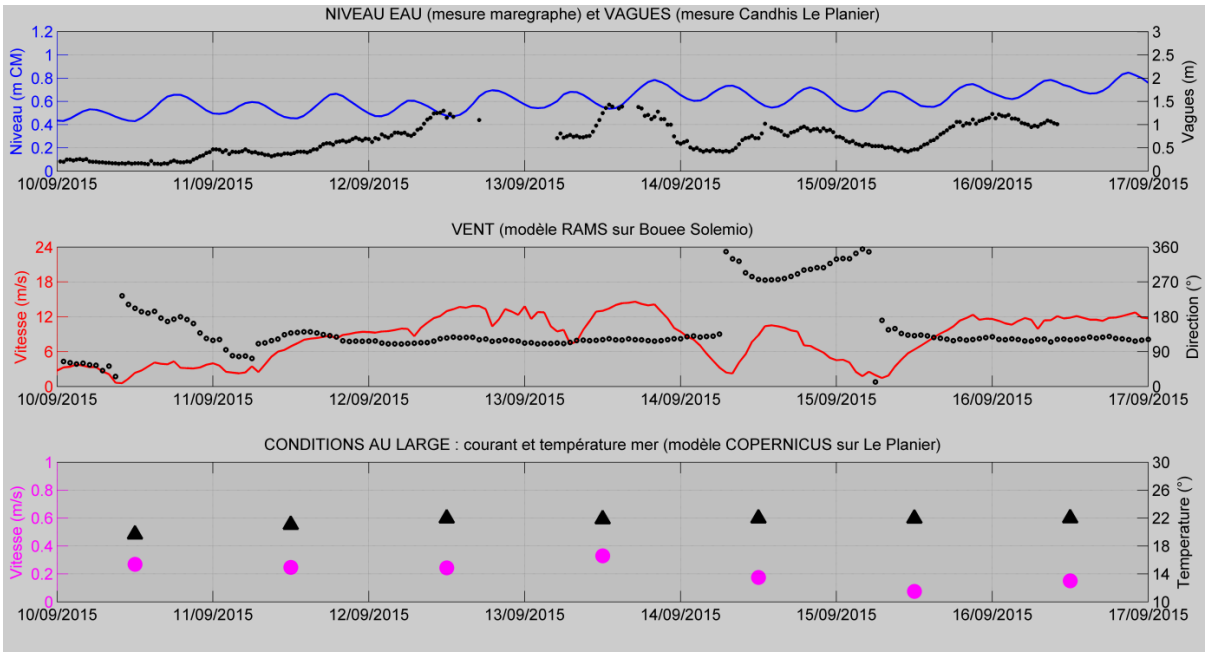


On constate que les régimes de vent et de vagues étaient globalement peu énergétiques au cours de cette campagne, hormis durant la journée du 12 où l'on pouvait observer un vent de secteur Est modéré et une hauteur de vagues jusqu'à 1,5 m. La courantologie au large était quant à elle assez variable, avec des vitesses faibles (< 0,2 m/s) à marquées (jusqu'à 0,4 m/s). La température de l'eau était stable autour de 22°C et l'ensoleillement était significatif au cours de la campagne.

3.4.5.3.2 Septembre 2015

L'évènement pluvieux qui a déclenché la deuxième campagne de mesures de l'année 2015 s'est déroulé dans la matinée du 13 septembre. La campagne a alors débuté au cours de cette même matinée et a duré jusqu'au 16 en milieu de journée (4 jours).

Figure 25 : Conditions océano-météorologiques pendant la campagne de septembre 2015

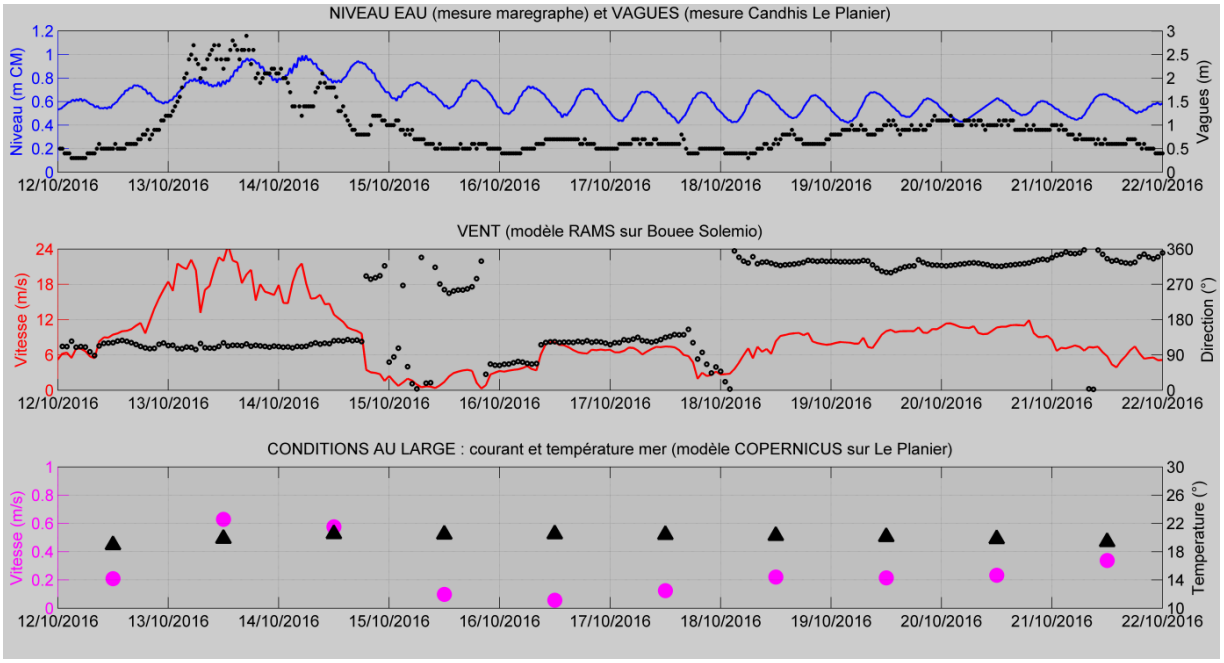


Au cours de cette deuxième campagne, un vent de secteur Est assez marqué a été majoritairement observé, avec cependant une journée de mistral modéré le 14. Les conditions de vagues étaient quant à elles assez faiblement énergétiques, avec un petit pic de hauteur à 1,5 m le 13. En ce qui concerne la courantologie, elle était encore une fois assez variable, avec des vitesses faibles (< 0,2m/s) à marquées (jusqu'à 0,4 m/s). La température de l'eau est restée stable autour de 22°C et l'ensoleillement était modéré durant la campagne.

3.4.5.3.3 Octobre 2016

L'évènement pluvieux ayant donnée suite à la troisième campagne s'est produit dans la matinée du 14 octobre 2016. Notons qu'un second épisode de pluie est survenu en cours de campagne, dans la soirée du 17, et qu'il a engendré une nouvelle reprise des cours naturels de l'Huveaune et du ruisseau de Bonneveine. La campagne de mesures s'est alors étalée de la matinée du 14 à la matinée du 21 (8 jours).

Figure 26 : Conditions océano-météorologiques pendant la campagne d'octobre 2016

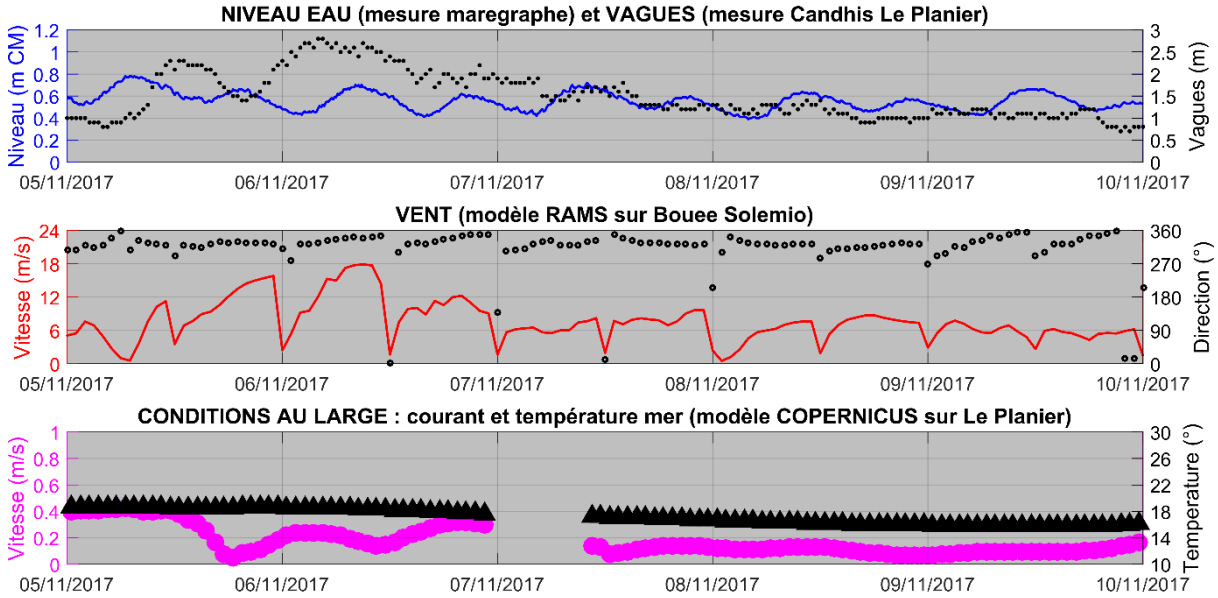


Un vent de secteur Est particulièrement fort a été observé au cours du premier jour de campagne, il est ensuite resté faible à modéré et de secteur variable. La configuration est similaire en ce qui concerne les vagues, leur énergie était en effet significative le 14, avec une hauteur pouvant aller jusqu'à plus de 2 m, et assez faible sur la suite de la campagne. Les courants au large étaient également très marqués (> 0,6 m/s) sur la journée du 14 et sont restés par la suite faibles à modérés. La température de l'eau a légèrement varié autour des 20°C et l'ensoleillement était faible à modéré pendant la campagne.

3.4.5.3.4 Novembre 2017

L'épisode de pluie ayant déclenché la dernière campagne s'est déroulé dans la nuit du 5 novembre 2017. La campagne s'est alors déroulée entre la matinée du 5 et celle du 9, c'est-à-dire sur 5 jours.

Figure 27 : Conditions océano-météorologiques pendant la campagne de novembre 2017



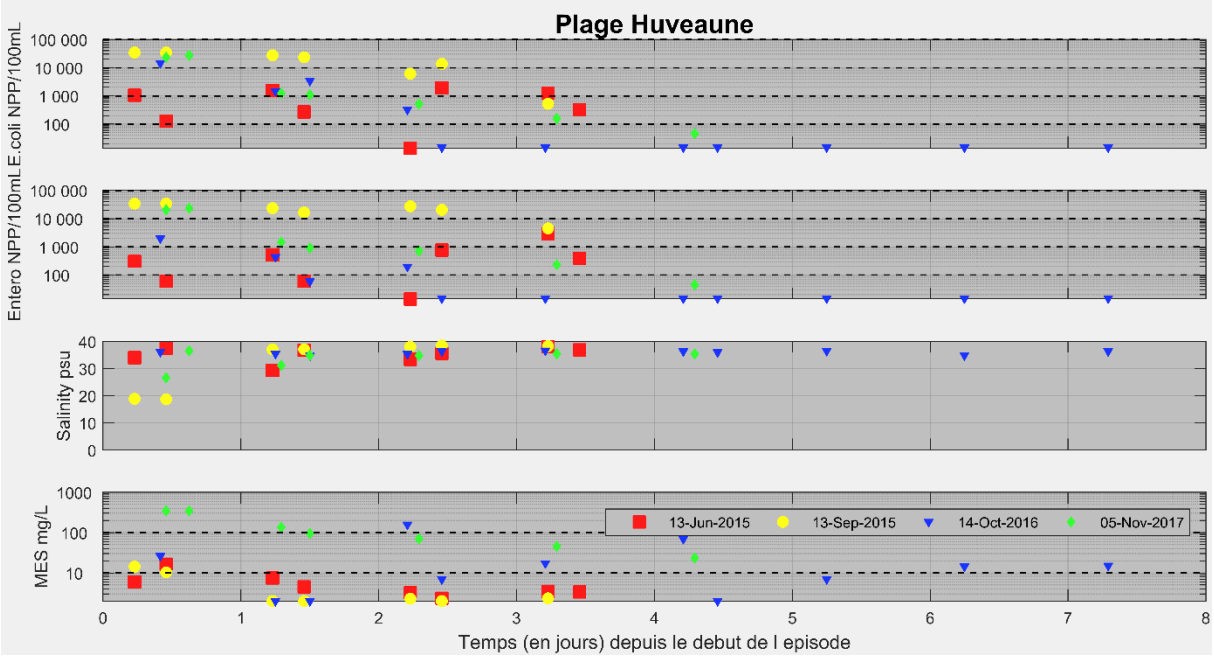
Sur le début de la campagne, un vent de secteur Nord-Ouest assez soutenu a été observé, il est ensuite devenu faible à modéré (toujours dans le même secteur). De la même manière, les conditions de vagues étaient énergétiques à très énergétiques entre le 5 et le 7, avec un pic de hauteur à près de 3 m, puis modérées ensuite. La courantologie au large a fortement varié sur le début de la campagne, allant du faible (quasi nulle) au soutenu (0.4 m/s), elle est restée faible à modéré par la suite. La température de l'eau a quant à elle diminué au cours de la campagne, passant de 19°C à 17°C, avec un ensoleillement assez faible dans l'ensemble.

3.4.5.4 DYNAMIQUE BACTÉRIOLOGIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE AUX POINTS DE PRÉLÈVEMENTS

3.4.5.4.1 Point de prélèvement ARS sur la plage de l'Huveaune

La plage de l'Huveaune a été fortement à très fortement impactée au cours de chaque campagne. La dynamique des variations des concentrations bactériologiques, de la salinité, et de la MES sont toutefois très différentes selon les cas. La figure suivante montre l'évolution des paramètres bactériologiques et physico-chimiques au point de prélèvement ARS lors des différentes campagnes. A titre d'exemple, on note que la campagne de juin 2015 se caractérise par des fortes oscillations des concentrations bactériologiques alors que les autres campagnes présentent des décroissances plutôt régulières de ces mêmes concentrations. On s'aperçoit également que les deux premières campagnes n'ont pas été assez longues pour mesurer un retour à la conformité sur la plage. En revanche, il a bien été observé lors des deux dernières, plus longues, et présentant de surcroit des décroissances plus rapides.

Figure 28 : Dynamique bactériologique et physico-chimique au point de prélèvement ARS de la plage de l'Huveaune



Il est clair que les dynamiques observées selon les campagnes dépendent de nombreux facteurs tels que la hauteur des vagues, la température de l'eau, l'ensoleillement, la marée, les courants, les rejets initiaux, etc. On comprend donc bien qu'il y ait des différences notables entre les campagnes mais il est difficile de les associer avec certitude à l'un ou l'autre des paramètres mentionnés. On pourrait toutefois supposer que le fait que la plus grande décroissance bactériologique soit observée sur le début de la campagne de novembre 2017 s'explique par de conditions de vagues particulièrement énergétiques.

3.4.5.4.2 Points adjacents au point de prélèvement ARS

Dans cette partie sont résumés les résultats des mesures effectuées sur les 3 points adjacents au point de prélèvement ARS de la plage. Il s'agit des points Mer Proche Huveaune (MPH), Mer Large Huveaune (MLH) et Plage Huveaune Sud (PHS). Les figures représentant l'évolution des différents paramètres en ces points sont disponibles en annexe 6.

Le tableau ci-dessous permet une comparaison des dynamiques bactériologique et physico-chimique des 3 points avec celle du point ARS de l'Huveaune. Des degrés de similitudes (compris entre 0 et 5), basés sur des observations purement qualitatives, y sont alors proposés.

Tableau 14 : Degré de similitude (sur 5) entre les dynamiques des points adjacents au point ARS et le point ARS – MPH Mer Proche Huveaune – MLH Mer Large Huveaune – PHS Plage Huveaune Sud

	Juin 2015			Septembre 2015			Octobre 2016			Novembre 2017		
	MPH	**MLH**	**PHS**	**MPH**	**MLH**	**PHS**	**MPH**	**MLH**	**PHS**	**MPH**	**MLH**	**PHS**
Bactério	4	3	4	4	4	4	Pluie 1: 3 Pluie 2: 0.5	Pluie 1: 3 Pluie 2: 0.5	Pluie 1: 4 Pluie 2: 1	3	x	3.5
Salinité	3.5	3.5	3.5	3	3	4	Pluie 1: 3.5 Pluie 2: 3.5	Pluie 1: 4 Pluie 2: 4	Pluie 1: 4 Pluie 2: 4	1.5	x	2
MES	2.5	2.5	3	3	3	4	Pluie 1: 2 Pluie 2: 2	Pluie 1: 2 Pluie 2: 2	Pluie 1: 2 Pluie 2: 2	3.5	x	2.5

Les dynamiques bactériologique et physico-chimique sont assez proches entre le point de prélèvement ARS et ses points adjacents au cours de chaque campagne. Ceci n'est cependant pas le cas après la deuxième pluie de l'épisode d'octobre 2016 où le signal bactériologique au point ARS est surprenant car aucune dégradation n'y a été mesurée. Tout comme pour le point ARS, on observe une grande variabilité sur l'évolution des différents paramètres en fonction de la campagne et donc des paramètres océano-météorologiques.

Dans la plupart des cas, le point qui présente les plus grandes concentrations bactériologiques est Mer Proche Huveaune. Etant donnée la position de ce point, ceci suggère que la plus grande partie de la pollution responsable de la dégradation de la plage de l'Huveaune transite par la rivière. On en déduit que la rivière Huveaune et/ou les sources qui s'y jettent (DO Prado notamment) contribuent fortement à la persistance de la pollution sur la plage.

3.4.5.4.3 Autres plages

Dans cette partie sont résumés les résultats des mesures effectuées sur les 3 plages qui entourent celle de l'Huveaune, à savoir les plages du Prado, de Borely, et de Bonneveine. Les figures représentant l'évolution des différents paramètres en ces points sont disponibles en Annexe 6.

Le tableau ci-dessous permet une comparaison des dynamiques bactériologique et physico-chimique sur les 3 plages avec celle de l'Huveaune. De la même manière que dans le paragraphe précédent, des degrés de similitudes (compris entre 0 et 5), basés sur des observations purement qualitatives, y sont alors proposés. Les résultats des mesures épisode par épisode ayant aidé à la construction de ce tableau sont présentés en Annexe 6.

Tableau 15 : Degré de similitude (sur 5) entre les dynamiques sur la plage de l'Huveaune et sur les autres plages

	Juin 2015			Septembre 2015			Octobre 2016			Novembre 2017		
	Bor.	**Prad.**	**Bon.**	**Bor.**	**Prad.**	**Bon.**	**Bor.**	**Prad.**	**Bon.**	**Bor.**	**Prad.**	**Bon.**
Bactério	3.5	3	2.5	3.5	2.5	2.5	Pluie 1: 3.5 Pluie 2: 0	Pluie 1: 2 Pluie 2: 1	Pluie 1: 2 Pluie 2: 4	3	3	3.5
Salinité	4	3	3	4	2.5	2.5	Pluie 1: 4 Pluie 2: 4	Pluie 1: 4 Pluie 2: 4	Pluie 1: 4 Pluie 2: 4	2.5	2.5	3
MES	2.5	3.5	3	4	2.5	2.5	Pluie 1: 1 Pluie 2: 1	Pluie 1: 1 Pluie 2: 1	Pluie 1: 1 Pluie 2: 1	3	2	3.5

Des similitudes entre les dynamiques des paramètres bactériologiques et physico-chimique sont visibles entre la plage de l'Huveaune et les plages qui l'entourent (moins visible au cours de la campagne d'octobre 2016). Elles sont toutefois moins marquées dans l'ensemble qu'avec les points adjacents à cette même plage. **Comme on pouvait s'y attendre, la plage de l'Huveaune est particulièrement dégradée au cours des différentes campagnes. C'est également le cas pour la plage de Borely tandis que les plages du Prado et de Bonneveine sont nettement moins affectées.**

3.4.5.4.4 Sources

3.4.5.4.4.1 Déversoir d'orage Prado

Le DO Prado est une source identifiée comme ayant un fort potentiel de dégradation sur la plage de l'Huveaune, avec une contribution possible au phénomène de persistance qui y est observé du fait de ses 2 000 m^3 d'eau stagnante (estimation). Au cours des deux premières campagnes de 2015, les mesures relatives à cette source ont été effectuées aux droits des exutoires du DO, en mer et dans l'Huveaune au niveau du pont de l'avenue Pierre Mendes France. Au cours des deux campagnes suivantes, les prélèvements ont été réalisés à l'intérieur du DO, juste avant ses exutoires en mer et dans l'Huveaune. En plus de cet ajustement de protocole, on rappelle que pour ces 2 campagnes un nouveau point de prélèvement a été mis en place en amont du décroisement du DO Prado. Ces adaptations ont vocation à déterminer avec plus de précision la répartition de la dégradation à

l'intérieur du DO et donc le potentiel de dégradation associé à cette source. Les dynamiques bactériologique et physico-chimique en ces points au cours des différentes campagnes sont présentées en Annexe 6.

Exutoires du DO

On constate que les échantillons prélevés au niveau des exutoires du DO Prado sont très dégradés à la suite de chaque épisode pluvieux, y compris en octobre 2016 alors qu'il n'y a pas eu de déversement au niveau de la station de relevage de la Muette. La vitesse de décroissance bactériologique varie cependant fortement en fonction de chaque campagne. Le changement des positions des points de prélèvements entre les 2 premières campagnes et les 2 dernières campagnes ne semble pas induire de changement radical sur les mesures. Il semblerait donc que les eaux résiduelles situées aux exutoires du DO Prado se mélangent assez fortement avec le milieu extérieur.

DO Prado avant décroisement

Les mesures réalisées en amont du décroisement permettent de mettre en évidence le fait que le DO Prado a un fort potentiel de dégradation et de participation au phénomène de persistance de la dégradation. En effet, les concentrations bactériologiques mesurées à l'intérieur du DO peuvent être très importantes (> 1 000 000 NPP/100 ml) et ont la particularité d'augmenter plusieurs jours après un épisode pluvieux. A ce stade, deux hypothèses pourraient principalement expliquer de telles augmentations des concentrations : de nouveaux apports (mauvais branchements/réseau pluvial) dans le DO et/ou une capacité des bactéries à se développer à l'intérieur du DO qui serait un milieu propice à ce phénomène.

3.4.5.4.4.2 Surverse du lac Borely

La surverse du lac Borely a été identifié comme pouvant participer au phénomène de persistante de la dégradation dans le secteur de l'Huveaune à la suite d'un épisode pluvieux. Les 4 campagnes réalisées au cours de cette étude permettent désormais d'éliminer cette hypothèse. En effet, les concentrations bactériologiques et le débit (~0,6 l/s) associés à la surverse sont trop faibles pour contaminer la rivière jusqu'à son embouchure, et donc à plus forte raison les plages situées à proximité. Les résultats des mesures sur lesquelles s'appuie cette conclusion sont disponibles en Annexe 6. On rappelle notamment que les prélèvements étaient réalisés dans la rivière au droit de la surverse lors des deux premières campagnes alors qu'ils étaient directement à la source lors des deux dernières. Cette adaptation du protocole de mesure a été décisive dans l'élimination de la surverse comme source de dégradation significative en révélant que l'eau du rejet n'était pas plus dégradée que celle de la rivière à proximité.

3.4.5.4.4.3 Rivière Huveaune

La rivière Huveaune, de par les volumes mis en jeu à chaque rejet et les masses d'eau résiduelles qui échangent ensuite avec la mer au gré des marées, est considérée comme une source de dégradation importante pour les plages situées à proximité. Elle pourrait notamment contribuer fortement au phénomène de persistance de la pollution sur la plage de l'Huveaune. Des mesures ont alors été réalisées en deux points distincts de la partie aval de la rivière : au niveau du pont de l'embouchure et au niveau du pont Borely. Ces points situés à proximité de l'embouchure sont toujours en eau, contrairement à la partie plus en amont qui ne l'est que lors d'une reprise du cours naturel de l'Huveaune. On note également que des analyses ont été effectuées juste en amont du barrage de la Pugette. Ce point permet une évaluation des rejets initiaux de l'Huveaune dans le milieu, lors de la reprise de son cours naturel, ainsi qu'un contrôle de la décroissance bactériologique dans la rivière à la suite de ceci. Au cours de la période de temps sec qui fait suite à un tel épisode, ces mesures ne sont plus à relier à la persistance de la pollution sur les plages car complètement déconnectées de ces zones. Les dynamiques des différents paramètres mesurés dans la rivière sont présentées dans les figures de de l'Annexe 6.

Point amont Pugette

Les concentrations bactériologiques qui ont été mesurées en amont du Barrage de la Pugette à la suite d'une reprise du cours naturel de l'Huveaune sont très grandes (~10^5 à 10^6 NPP/100 ml). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les estimations habituellement associées à la rivière et confirment qu'elle est une contributrice significative à la dégradation initialement rejetée en mer lors d'un épisode de pluie important.

En ce qui concerne la décroissance bactériologique post évènement, on constate encore une fois qu'elle varie beaucoup d'une campagne à l'autre. Les concentrations diminuent notamment très rapidement à la suite de l'épisode d'octobre 2016, avec des valeurs de l'ordre de 100 NPP/100 ml, alors que ceci n'est pas du tout le cas pendant les autres campagnes où elles stagnent autour de 10 000 NPP/100 ml.

Pont Borely et Pont de l'Embouchure

Tout comme en amont du barrage de la Pugette, les concentrations bactériologiques mesurées plus en aval dans la rivière sont très importantes juste après la reprise de son cours naturel (~100 000 NPP/100 ml). Le retour à des concentrations « normales » dans la rivière est ensuite assez lent, d'autant plus au niveau du Pont Borely où la dégradation est globalement nettement plus forte qu'au niveau du Pont de l'Embouchure à partir du deuxième jour de campagne. Etant donnée cette répartition de la dégradation dans la rivière, il est possible que les concentrations soient encore plus importantes si l'on remonte la partie aval de la rivière jusqu'à sa limite en eau.

A ce stade, la rivière Huveaune est encore à considérer comme un réservoir d'eau polluée significatif susceptible de contribuer au phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune.

3.4.5.4.4.4 Ruisseau Bonneveine

Le ruisseau de Bonneveine, canalisé sur sa partie aval, ne rejoint la mer qu'à la suite d'un épisode pluvieux significatif. Outre les apports initiaux de cette source dans le milieu au cours d'un tel épisode, le volume d'eau stagnante dans la canalisation pourrait contribuer à la persistance de la dégradation sur les plages aux alentours. On rappelle qu'au cours des deux premières campagnes, le seul point de prélèvement associé à cette source était situé au niveau du poste de Hambourg (avec des mesures uniquement sur les premiers jours des campagnes). En revanche, lors des deux dernières campagnes, un nouveau point de prélèvement, situé à l'exutoire du ruisseau (dans la canalisation), est venu compléter le protocole. Si les analyses au niveau du poste de Hambourg permettent d'estimer les apports du ruisseau de Bonneveine dans le milieu au cours d'un épisode pluvieux, celles situées à son exutoire sont plus appropriées pour l'évaluation de la contribution de cette source au phénomène de persistance de la dégradation. Les dynamiques des différents paramètres mesurés dans la rivière sont présentées dans l'Annexe 6.

Poste de Hambourg

Les concentrations bactériologiques mesurées au niveau de poste de Hambourg, de l'ordre de 10^5 NPP/100 ml, sont en accord avec les estimations qui étaient déjà associées au ruisseau de Bonneveine.

Exutoire du ruisseau

Les analyses réalisées à l'exutoire du ruisseau révèlent des dégradations très importantes et très persistantes dans les eaux résiduelles situées à l'intérieur de la canalisation. L'épisode d'octobre 2017 en est un exemple frappant avec une concentration en entérocoques fécaux qui stagne autour de 10^5 NPP/100 ml durant les 5 jours de la campagne. **Etant donnés ces résultats, les eaux résiduelles contenues dans la canalisation du ruisseau de Bonneveine pourraient donc contribuer au phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune.**

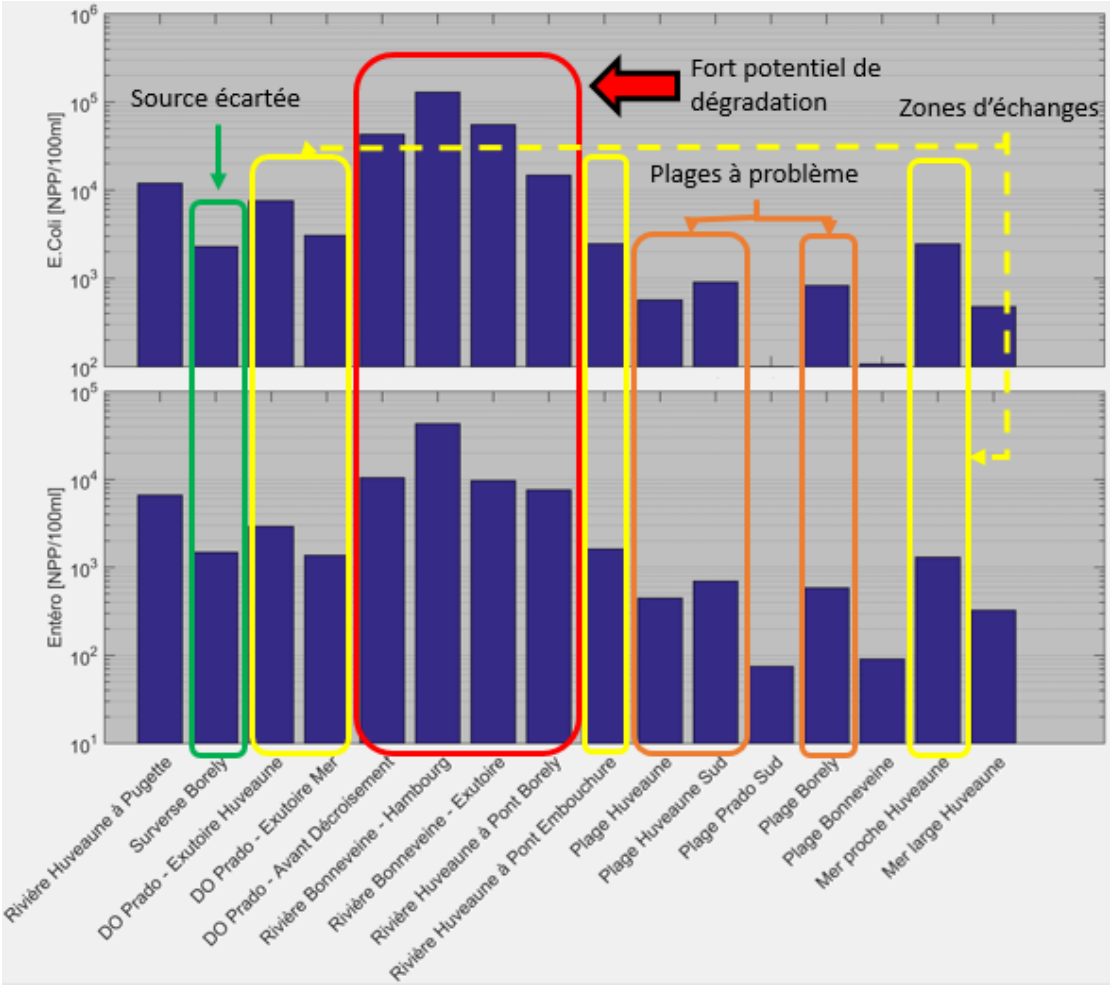
3.4.5.5 BILAN DES SOURCES DE POLLUTIONS POTENTIELLES

3.4.5.5.1 Moyennes globales des mesures en chaque point

3.4.5.5.1.1 Concentrations bactériologiques

Dans cette partie, l'ensemble des mesures réalisées au cours des différentes campagnes ont été moyennées en chaque point de prélèvement afin d'avoir une vision globale de la répartition des valeurs dans la zone d'étude. La Figure 29 ci-dessous représente alors les moyennes logarithmiques des concentrations bactériologiques.

Figure 29 : Moyennes logarithmiques des concentrations bactériologiques sur l'ensemble des campagnes de mesures en chaque point de prélèvement de la zone d'étude



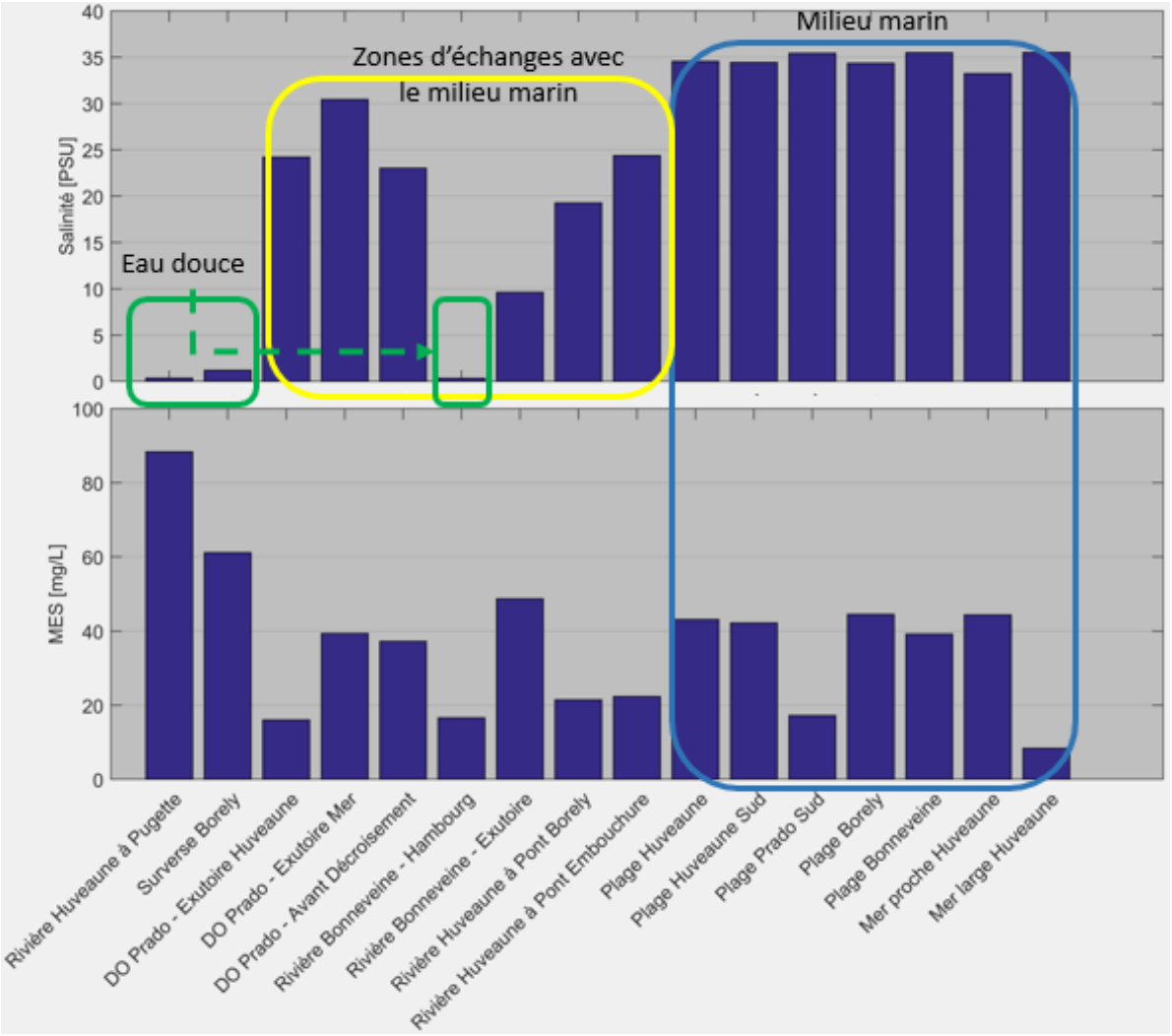
Les valeurs moyennes permettent une bonne synthèse des différentes conclusions qui ont déjà été tirées quant au phénomène de persistance de la dégradation autour de la plage de l'Huveaune. A savoir que :

- **Une source peut être écartée : la surverse du lac Borely** *(dégradation modérée en comparaison de ce qui est observé dans l'Huveaune et très faible débit)*
- **3 sources sont identifiées comme ayant un fort potentiel de dégradation :**
  - **La rivière Huveaune** *(dégradation significative au niveau du pont Borely, potentiellement représentative d'un gros volume d'eau résiduelle dans la rivière)*
  - **Le DO Prado** *(dégradation très importante avant le décroisement et significative aux exutoires, avec une estimation de 2 000 m^3 d'eau stagnante dans le DO)*
  - **Le ruisseau de Bonneveine** *(extrêmement dégradé à l'embouchure)*
- **Les plages de l'Huveaune sont particulièrement touchées** alors que ce n'est pas le cas pour celles du Prado et de Bonneveine

3.4.5.5.1.2 Salinité et matières en suspension (MES)

On ne s'intéresse ici qu'à la salinité et à aux MES. La Figure 30 représente alors les valeurs moyennes sur l'ensemble des points de la zone d'étude.

Figure 30 : Valeurs moyennes des mesures de salinité et des MES sur l'ensemble des campagnes de mesures en chaque point de prélèvement de la zone d'étude



Les valeurs moyennes de salinité permettent aisément de classer les différents points de prélèvements en des catégories distinctes :

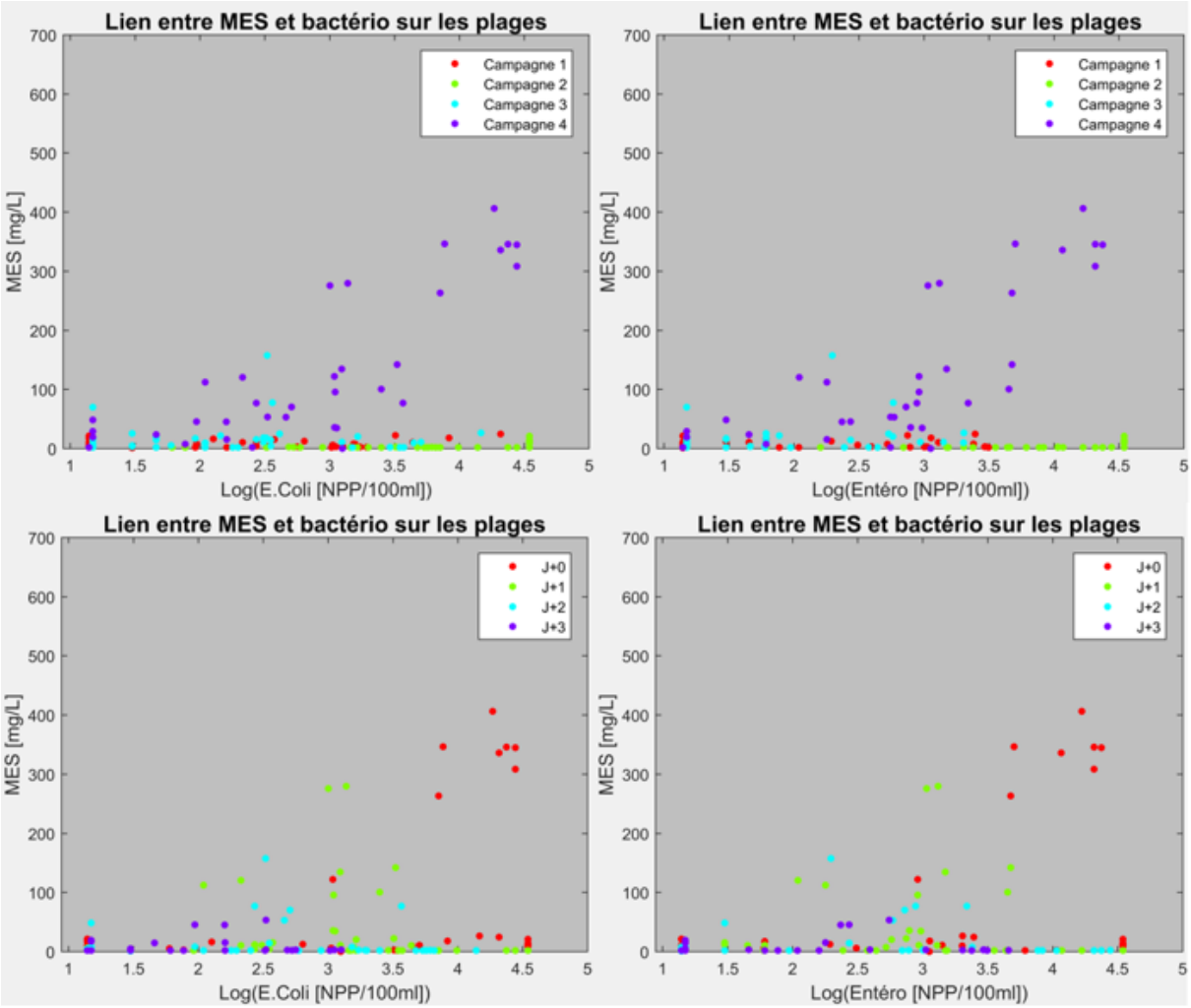
- Les points en milieu marin : points plages et mer qui ont une salinité moyenne supérieure à 30 PSU.
- Les eaux résiduelles des sources qui échangent avec le milieu marin au gré des courants et des marées, avec une salinité moyenne comprise entre 10 et 30 g/l.
- Les points sources qui n'échangent pas avec le milieu marin et où l'eau est donc douce. On distingue tout de même les points « Rivière Huveaune à Pugette » et « Rivière Bonneveine à Hambourg » qui sont complètement déconnectés du milieu dès lors que le déversement est terminé et le point « Surverse Borely » qui se déverse fréquemment dans le milieu.

En ce qui concerne les valeurs moyennes de MES, on se rend compte qu'elles ne sont pas corrélées avec les concentrations bactériologiques moyennes. Le paragraphe qui suit s'intéresse plus particulièrement à ce sujet.

3.4.5.5.2 Corrélation entre MES et concentrations bactériologiques

La remise en suspension de sédiments à la suite d'un épisode pluvieux pourrait possiblement contribuer au phénomène de persistance de la pollution sur les plages situées dans le secteur de l'Huveaune. L'observation d'une corrélation entre MES et concentrations bactériologiques permettrait alors de valider cette hypothèse. La Figure 31 confronte ces paramètres entre eux sur l'ensemble des points plages (Huveaune, Huveaune Sud, Prado Sud et Borely et Bonneveine), avec une différenciation des campagnes d'une part, et une différenciation des jours post épisodes de pluie d'autre part. **On s'aperçoit cependant qu'aucune corrélation (ou presque) n'est visible entre MES et concentrations bactériologiques sur les plages**. On pourrait penser qu'il en existe une en se concentrant uniquement sur la campagne de novembre 2017 mais l'on se rend compte que ceci est uniquement lié au fait que la MES était exceptionnellement forte en début de campagne, et qu'elle a ensuite diminué tout comme l'ont fait les concentrations bactériologiques.

Figure 31 : Graphes de corrélations entre MES et concentrations bactériologiques, avec différenciation des campagnes (en haut) et différenciation des jours post début de campagnes (en bas)

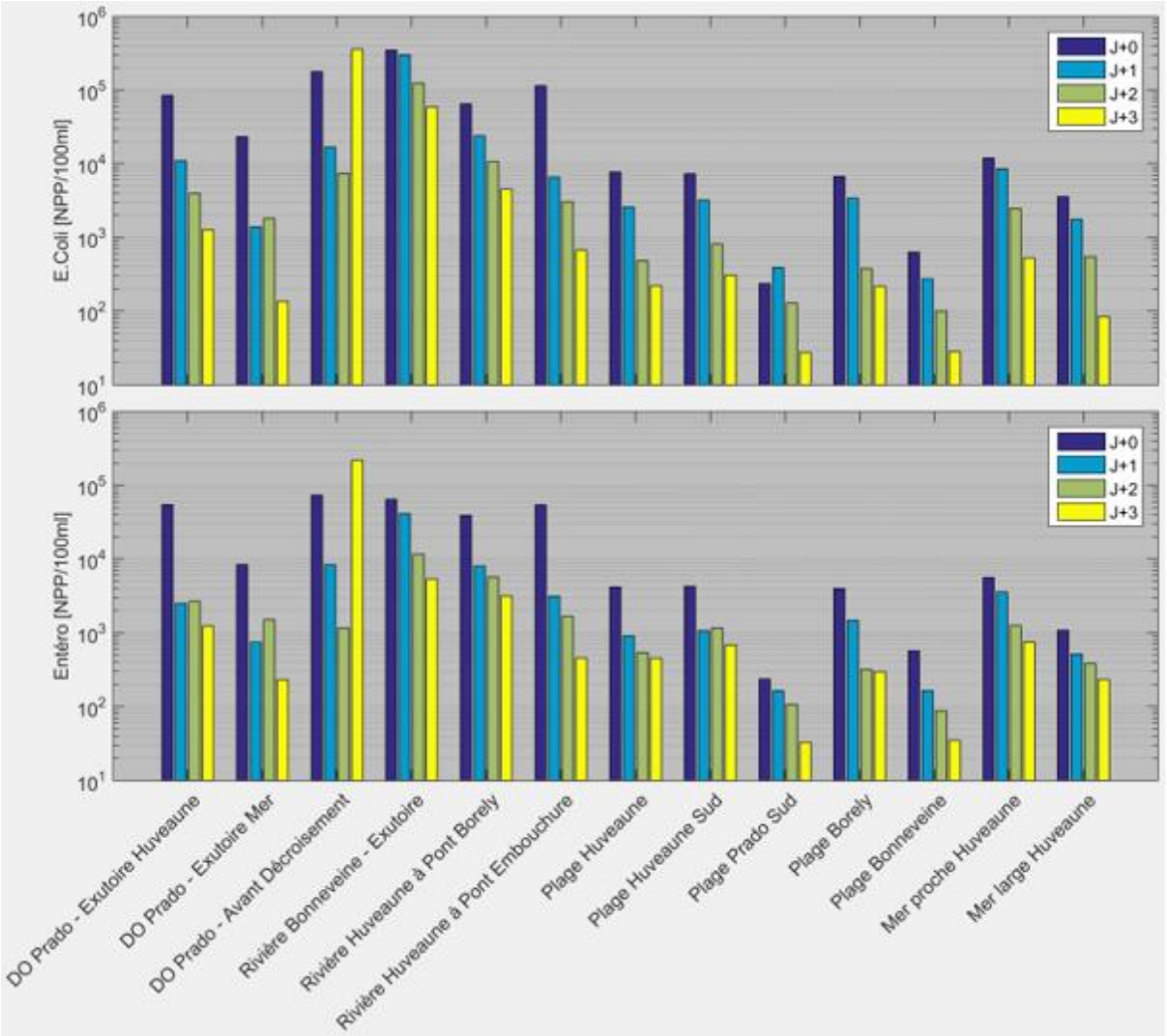


Les campagnes de mesures ne permettent donc pas de mettre en évidence un lien entre persistance de la pollution sur les plages et remise en suspension des sédiments, ce qui ne remet pas en cause la possibilité d'un tel phénomène sous certaines conditions océano-météorologiques.

3.4.5.5.3 Dynamiques bactériologiques moyennes en chaque point de prélèvement

Dans cette partie nous nous intéresserons aux dynamiques bactériologiques moyennes sur les différents points de prélèvements de notre zone d'étude. La Figure 32 ci-dessous représente les concentrations bactériologiques moyennées par jour suivant le début des campagnes (toutes campagnes confondues jusqu'au 4ème jour) et en chaque point. A titre d'exemple, la concentration moyenne en Entérocoques fécaux à J+0 sur la plage de l'Huveaune (4.10^3 NPP/100 ml) correspond à la moyenne logarithmique des 8 concentrations mesurées en ce point au cours de chaque première journée de chacune des 4 campagnes (2 tournées par première journée de campagne).

Figure 32 : Dynamiques moyennes des concentrations bactériologiques sur les 4 premiers jours de campagnes en chaque point prélèvement.



Comme cela avait été mentionné plus tôt, on voit clairement une augmentation significative des concentrations moyennes entre le troisième et le quatrième jour de campagne à l'intérieur du DO Prado (avant décroisement). La Figure 32 permet également de constater que la vitesse et la régularité de la décroissance (ou non décroissance) bactériologique varie fortement en fonction des points. Le tableau suivant résume sous une autres formes quelques aspects importants sur les dynamiques bactériologiques moyennes.

Tableau 16 : Chiffres clés sur les dynamiques bactériologiques moyenne aux différents points de la zone d'étude

Milieu	Point	Rapport J+0/J+3 *E.coli/Entéro*	Valeur à J+3 (NPP/100 ml) *E.coli/Entéro*
Sources	DO Prado – Huveaune	65 / 45	1 300 / 1 200
	DO Prado - Mer	175 / 35	140 / 230
	DO Prado - Amont	**<1**	**350 000 / 220 000**
	Bonneveine – Exutoire	**5 / 10**	**59 000 / 5 400**
	Huveaune - Borely	**15 / 10**	**4 500 / 3 200**
	Huveaune - Embouchure	170 / 120	670 / 460
Plages	Huveaune	35 / 10	**220 / 450**
	Huveaune Sud	25 / 5	**300 / 690**
	Prado Sud	10 / 5	30 / 30
	Borely	30 / 15	**214 / 296**
	Bonneveine	20 / 15	30 / 30
Mer	Proche Huveaune	20 / 5	520 / 750
	Large Huveaune	40 / 5	80 / 230

Les observations suivantes peuvent être tirées :

- Les vitesses de décroissance (ou non décroissance) des concentrations bactériologiques varient fortement selon les points sources et dans une moindre mesure selon les points plages et mer (cf colonne rapport J+0/J+3),
- La dégradation peut être encore très significative sur certains points sources au 4ème jour de campagne :
  - Rivière Huveaune au pont Borely,
  - DO Prado avant décroisement,
  - Exutoire du ruisseau de Bonneveine.
- Seules les plages de l'Huveaune et de Borely sont encore polluées au 4ème jour de campagne, avec une dégradation plus marquée en moyenne sur la plage de l'Huveaune.

3.5 Bilan des campagnes de mesures

Pollution par temps sec

Lors des enquêtes, les mesures réalisées ont permis d'estimer la charge journalière apportée par les exutoires pluviaux à 3.3 10^{10} NPP E. Coli (2.8 10^{10} NPP Entérocoques), ce qui représente l'équivalent de 30 l d'eau usées. 80 % de cette charge est apportée par 1 seul exutoire. Il apparaît que les exutoires des réseaux peuvent représenter des apports de pollution et il est donc important de continuer les recherches de pollution sur les exutoires pluviaux de l'Huveaune. Cependant, on relativisera leur poids par rapport aux charges apportées par l'Huveaune lors de ces déversements qui sont de l'ordre de 10^{15} NPP soit de 100 000 fois plus importantes.

Les nappes d'eau, hormis celle situées juste à l'aval du rejet contaminé, ne représentent qu'un faible réservoir de contamination estimé à 4 l d'eaux usées dans sa globalité. Cette charge est d'autant plus à relativiser que les nappes identifiées ne sont pas en contact direct avec l'embouchure de l'Huveaune.

Les sédiments représentent dans leur globalité une charge équivalente à celle contenue dans 50 l d'eaux d'usées. Cette charge est également à relativiser car les sédiments ne sont pas mobiles par temps sec ou par petites pluies.

On retiendra donc que la seule source de pollution potentiellement impactante en temps sec pour le milieu marin semble être les rejets d'eaux usées.

Pollution par temps de pluie

Les campagnes réalisées ont permis de montrer que les apports des exutoires, sédiments et nappes d'eau ne sont pas significatifs par rapport aux charges apportées par les déversements de l'Huveaune.

Les quatre campagnes de mesures réalisées à la suite de pluies significatives entre 2015 et 2017 auront permis :

- D'écarter la surverse de Borely et les exutoires pluviaux comme sources contribuant à la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune
- De valider la contribution potentielle de la rivière Huveaune, du ruisseau de Bonneveine, et du DO Prado (et canalisation du collecteur 18 bis) à ce même phénomène de persistance.

En revanche, certains phénomènes qui avaient été identifiés comme jouant potentiellement un rôle dans la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune n'ont pas pu être validés par les campagnes, à savoir :

- La remise en suspension de sédiments,
- Le retour du panache de l'Huveaune (qui aurait notamment suggéré des concentrations bactériologiques plus fortes au point Mer Large Huveaune qu'au point Mer Proche Huveaune à certains moments)

L'étape de modélisation numérique qui fait l'objet de la prochaine partie va permettre de juger qualitativement de la contribution de chaque source retenue au phénomène de persistance de la dégradation sur les plages situées dans la zone d'étude.

4 PHASE 2 : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Comme cela a été mentionné précédemment, les eaux résiduelles de la rivière Huveaune, du ruisseau de Bonneveine, et du DO Prado (et collecteur 18 bis), restent particulièrement dégradées dans les jours qui suivent un épisode pluvieux significatif. Ces sources ont alors été identifiées comme ayant une contribution potentiellement importante dans le phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune. C'est au gré des courants et des marées que les échanges se feraient entre les eaux résiduelles de ces différentes sources et le milieu marin. L'étape de modélisation numérique permet alors une estimation de ces échanges et de leur impact sur les plages : c'est ce qui fait l'objet de cette partie. Dans cette étape de modélisation, le modèle hydrodynamique Mohid est utilisé avec la même configuration que pour la gestion de la qualité des eaux de baignade sur la ville de Marseille.

4.1 Modèle hydrodynamique

Comme cela a été mentionné en introduction, une phase de modélisation numérique, qui permet de mieux appréhender la dynamique bactériologique dans la zone d'étude, a été réalisée. Elle a pour but de compléter les conclusions issues des campagnes de mesures, notamment en les validant ou les invalidant.

L'outil de modélisation hydrodynamique mis en œuvre dans cette étude se base sur l'utilisation du code MOHID WaterR dédié à la simulation des écoulements de surface (océans, estuaires, réservoirs).

La robustesse de MOHID lui permet d'être utilisé dans un contexte opérationnel, avec des temps de calcul limités, comme c'est le cas au sein des outils de Gestion Prédictive de la qualité des eaux littorales déployés par RPT.

4.2 Modèle de réseau

Le modèle du réseau unitaire de Marseille, développé sous PCSWMM, a été utilisé pour estimer les échanges entre les exutoires du réseau et le milieu naturel. PCSWMM intègre le moteur de calcul du logiciel SWMM qui résout les équations complètes de Barré Saint-Venant.

Le modèle utilisé sur la ville de Marseille regroupe les différents types de réseaux : unitaire, séparatif, et pluvial. La modélisation porte sur 214 km de réseaux structurants.

4.3 Détermination des conditions critiques de vent

L'un des principaux paramètres régissant la dynamique des courants dans la zone est le vent. De par sa grande variabilité, il est nécessaire de déterminer quels sont ses régimes les plus critiques pour un rabattement de la pollution sur la plage de l'Huveaune et de se concentrer uniquement sur ceux-ci afin de réduire le nombre de scénarii à modéliser. Dans un premier temps, la répartition des différents régimes de vent observés sur la zone d'étude a alors été étudiée (Figure 33). Il a ensuite été décidé de diviser les régimes prédominants en 7 secteurs (5 secteurs entre le Sud-Ouest et le Nord et 2 dans le quart Sud-Est) et de tester leur criticité au regard de chacune des 3 sources de dégradation retenues. En pratique, la rivière Huveaune et le DO Prado, dont les rejets rejoignent la mer approximativement au même endroit, ont été groupés. Le régime de vent critique est alors le même pour ces deux sources. 14 simulations ont donc été lancées pour déterminer les régimes de vents les plus critiques : 7 simulations pour tester la criticité du vent pour le rabattement de la pollution du ruisseau de Bonneveine vers la plage de l'Huveaune et 7 autres en se concentrant sur les sources Huveaune/DO Prado. Notons qu'une vitesse de vent modérée de 5 m/s a été retenue pour les simulations. **Finalement, c'est un vent d'Ouest (260°) qui est le plus critique pour la plage de l'Huveaune, et ce, que la pollution provienne du ruisseau de Bonneveine ou du secteur rivière Huveaune/DO Prado. C'est donc un régime de vent de secteur Ouest (260° à 5 m/s) qui a été retenu pour la suite de la modélisation.** Les champs de concentrations en Escherichia Coli obtenus avec ce régime de vent sont représentés sur la figure suivante.

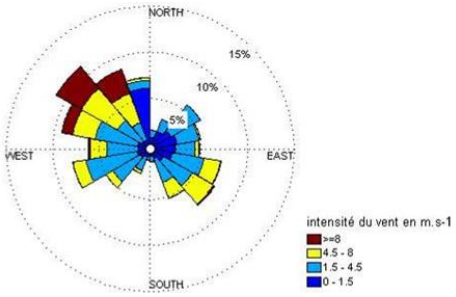
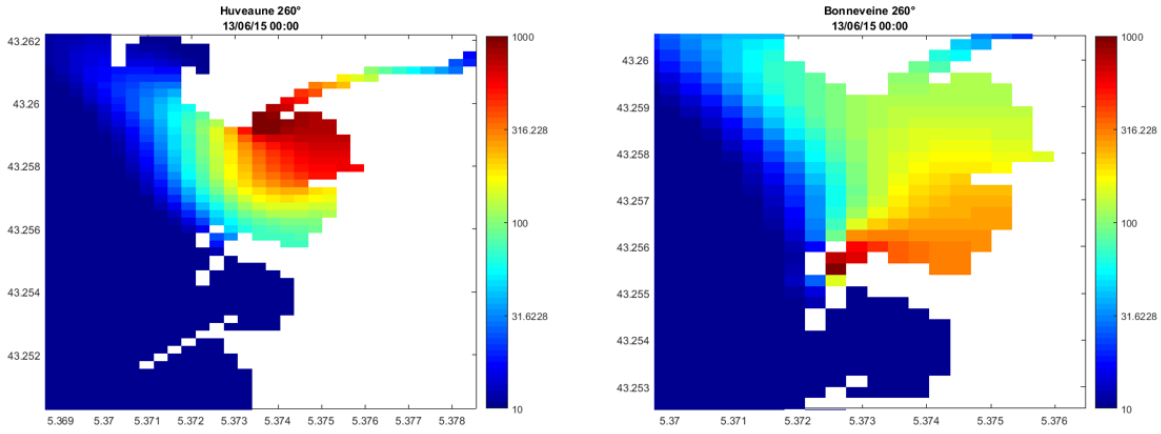


Figure 33 : Rose des vents (direction de provenance du vent) entre début Mai et fin Septembre de 2005 à 2009, données mesurées à la station de l'hippodrome de Marseille (Source: Météo France)

Figure 34 : Dissipation des panaches issus de la rivière Huveaune/DO Prado (gauche) et du ruisseau de Bonneveine (droite) pour un vent de direction 260° et de vitesse 5 m/s



4.4 Estimation des échanges entre les sources et le milieu

Si les échanges entre la rivière Huveaune et la mer sont directement représentés par le modèle hydrodynamique qui est capable de propager la marée dans la rivière, ceux entre le réseau (DO Prado et ruisseau de Bonneveine) et le milieu ne le sont pas. Une estimation de ces échanges, pilotés par la marée, a alors été faite grâce au modèle de réseau qui sert pour la gestion de la ville de Marseille. A partir des courbes de débits obtenues avec le modèle de réseau, des signaux parfaits, sinusoïdaux, ont été établis et injectés dans le modèle hydrodynamique aux exutoires du DO Prado (et collecteur 18 bis) et du ruisseau de Bonneveine.

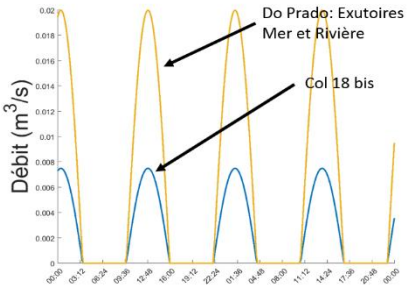


Figure 35 : Exemple de sinusoïdes parfaites pour injection du débit du DO Prado (et col. 18 bis) dans le modèle hydrodynamique en fonction de la marée

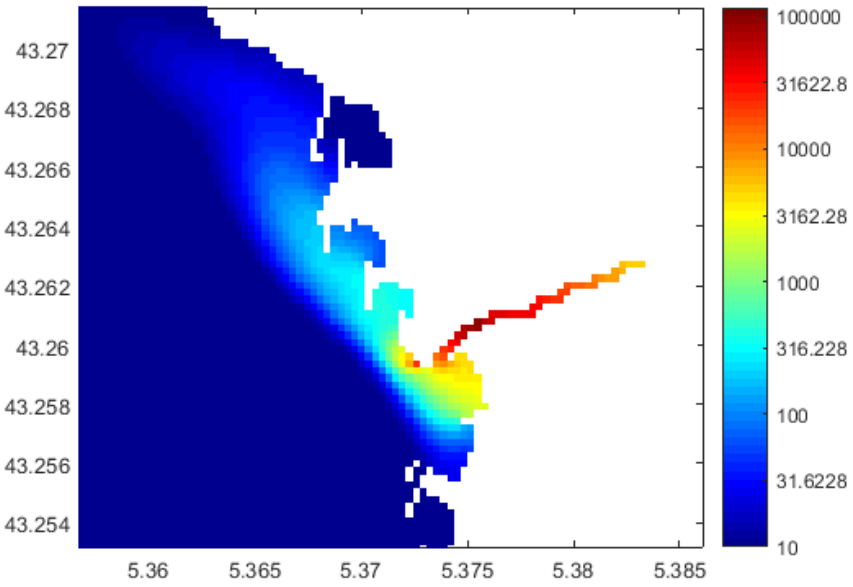
4.5 Caractérisation de l'impact des sources sur les plages

Afin de caractériser l'impact potentiel des sources sur les plages à l'aide du modèle hydrodynamique, deux stratégies différentes ont été adoptées. L'une étant adaptée au DO Prado et au ruisseau de Bonneveine, et l'autre à la rivière Huveaune.

4.5.1 Impact des eaux résiduelles du DO Prado

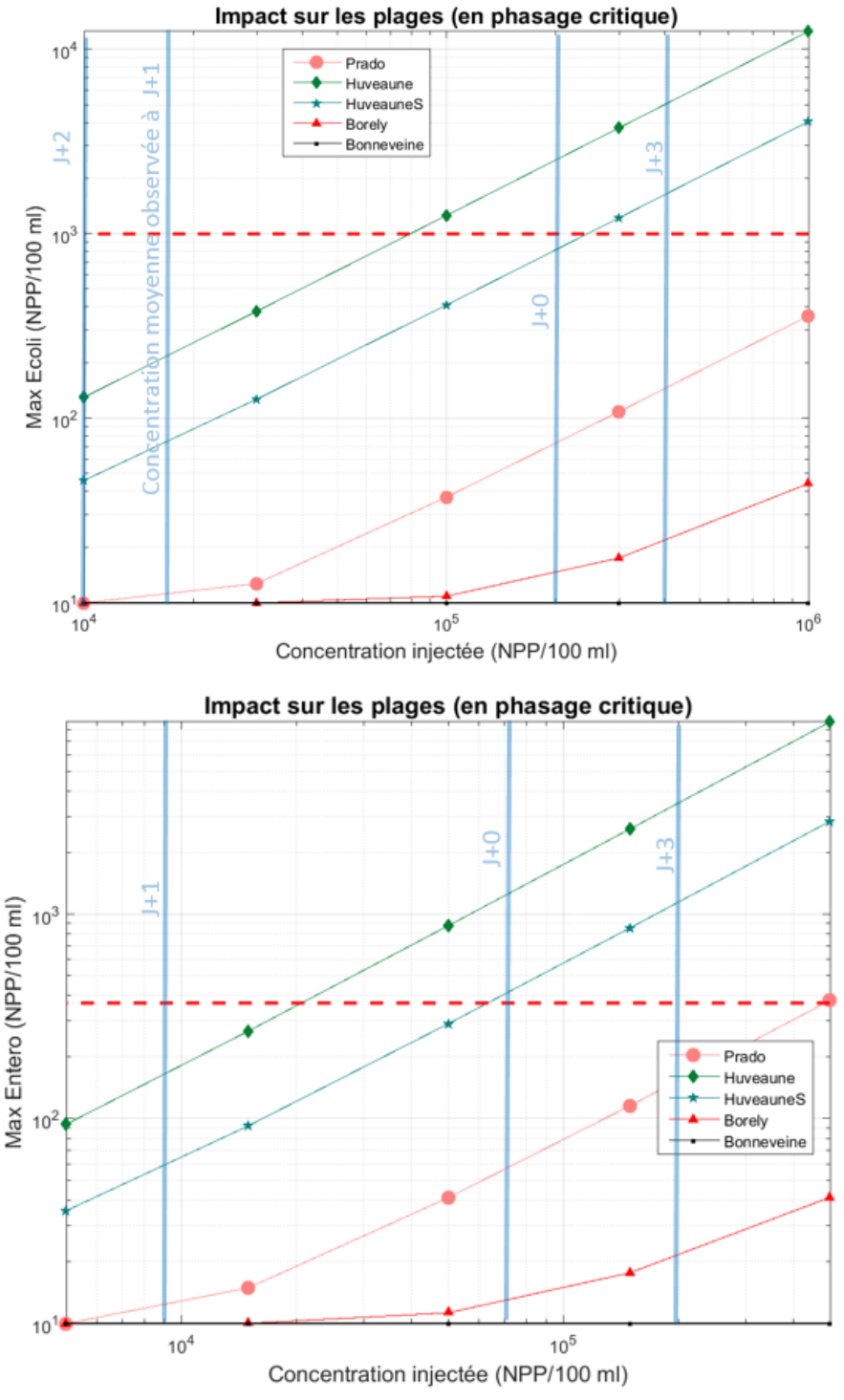
La stratégie adoptée pour caractériser les échanges entre les eaux résiduelles du DO Prado (et du collecteur 18 bis) reposes sur 5 simulations distinctes. Pour chaque simulation, des débits en sinusoïdes parfaites (cf partie précédente) sont injectés aux exutoires du DO et seules les concentrations de ces rejets varient d'une simulation à l'autre. Les concentrations injectées vont alors de 10^4 à 10^6 NPP/100 ml pour les E.Coli et de 5.10^3 à 5.10^5 NPP/100 ml pour les entérocoques. Dans ces simulations, le modèle est forcé par la marée et par un vent critique de secteur Ouest (260°) à 5 m/s. La Figure 36 illustre en exemple les résultats obtenus pour le champ de concentration en Escherichia Coli sur la zone d'étude à un instant critique et pour une concentration injectée aux exutoires du DO Prado (et du collecteur 18 bis) de 10^6 NPP/100 ml.

Figure 36 : Champ de concentration en E.Coli (NPP/100 ml) observé à un instant critique pour la plage de l'Huveaune pour une concentration injectée de 10^6 NPP/100 ml aux exutoires du DO Prado et du collecteur 18 bis



Les concentrations bactériologiques obtenues sur les différentes plages ont alors été extraites aux instants les plus critiques afin d'estimer l'impact potentiel des eaux résiduelles du DO Prado et du collecteur 18 bis sur chaque plage. Ces résultats sont représentés dans la figure suivante qui concentre un grand nombre d'informations. Sur les graphes de cette figure, les concentrations maximales obtenues sur chaque plage sont tout d'abord tracées en fonction de chaque concentration injectée. Afin de se situer par rapport aux résultats des campagnes, les valeurs moyennes (par jours post début de campagne) des concentrations mesurées au point situé en amont du décroisement du DO Prado sont représentées par des droites verticales. Les droites horizontales en pointillés représentent quant à elles les seuils de non-conformités.

Figure 37 : Concentrations maximales en E.Coli et Entérocoques obtenues sur les points plages en fonction des concentrations injectées aux exutoires du DO Prado et du collecteur 18 bis.



Dans les conditions de forçage du modèle, seule la plage de l'Huveaune peut être sérieusement impactée par les échanges entre les eaux résiduelles du DO Prado (et du collecteur 18 bis) et le milieu. En effet, on constate que le seuil de non-conformité n'est jamais franchi sur les autres plages. Notons qu'il est tout juste dépassé sur la plage du Prado pour une concentration injectée de 5.10^5 NPP/100 ml en Entérocoques, ce qui n'a été observé qu'une seule fois à l'intérieur du DO pendant les campagnes. Les concentrations mesurées en moyennes à j+0 et à j+3 à l'intérieur du DO induisent en revanche des dégradations significatives sur la plage de l'Huveaune. **Connaissant la forte persistance de la pollution dans le DO Prado, avec notamment la possibilité d'augmentation significative des concentrations plusieurs jours après un épisode de pluie, le modèle suggère que les eaux résiduelles du DO Prado et du collecteur 18 bis constituent effectivement une source pouvant contribuer à la persistance de la pollution sur la plage de l'Huveaune.**

On rappelle que les simulations ont été forcées par des conditions de vent particulièrement critiques pour la plage de l'Huveaune, et sans représentation des vagues qui pourraient participer à une dissipation plus importante de la pollution sur l'ensemble des plages. **Ces résultats ne veulent donc pas dire que les eaux résiduelles du DO Prado et du collecteur 18 bis ne pourraient jamais dégrader significativement les autres plages de notre zone d'étude.**

4.5.2 Impact des eaux résiduelles du ruisseau de Bonneveine

On rappelle que la stratégie adoptée pour la caractérisation des échanges entre les eaux résiduelles du ruisseau de Bonneveine et le milieu marin est la même que celle décrite dans le paragraphe précédent. Ainsi, 5 simulations, forcées par la marée et par des conditions critiques de vent (260° à 5 m/s), ont été lancées avec différentes concentrations bactériologiques injectées à l'exutoire du ruisseau. La Figure 38 illustre les résultats obtenus pour les champs de concentration en Escherichia Coli et Entérocoques sur la zone d'étude à un instant critique et pour une concentration injectée à l'exutoire du ruisseau de Bonneveine de 10^6 NPP/100 ml. De la même manière que dans la partie précédente, la

Figure 39 résume l'impact potentiel des eaux résiduelles du ruisseau de Bonneveine sur les différentes plages de la zone d'étude en fonction de leurs concentrations bactériologiques.

Figure 38 : Champ de concentration en E.Coli (NPP/100 ml) observé à un instant critique pour la plage de l'Huveaune pour une concentration injectée de 10^6 NPP/100 ml à l'exutoire du ruisseau de Bonneveine

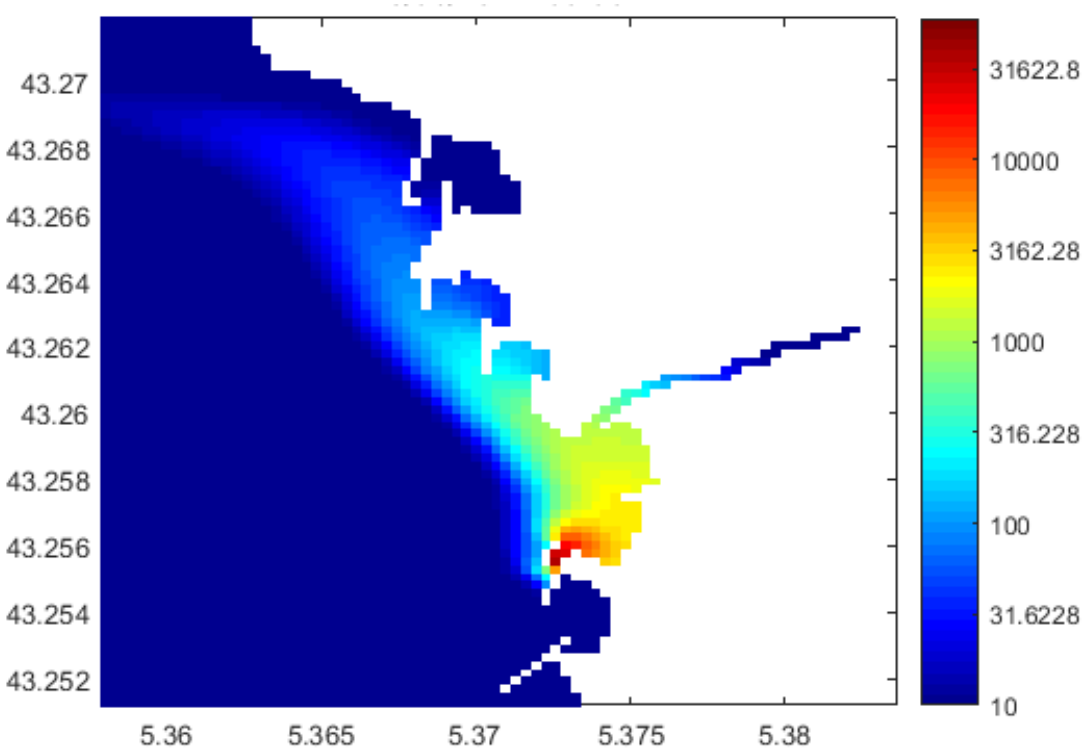
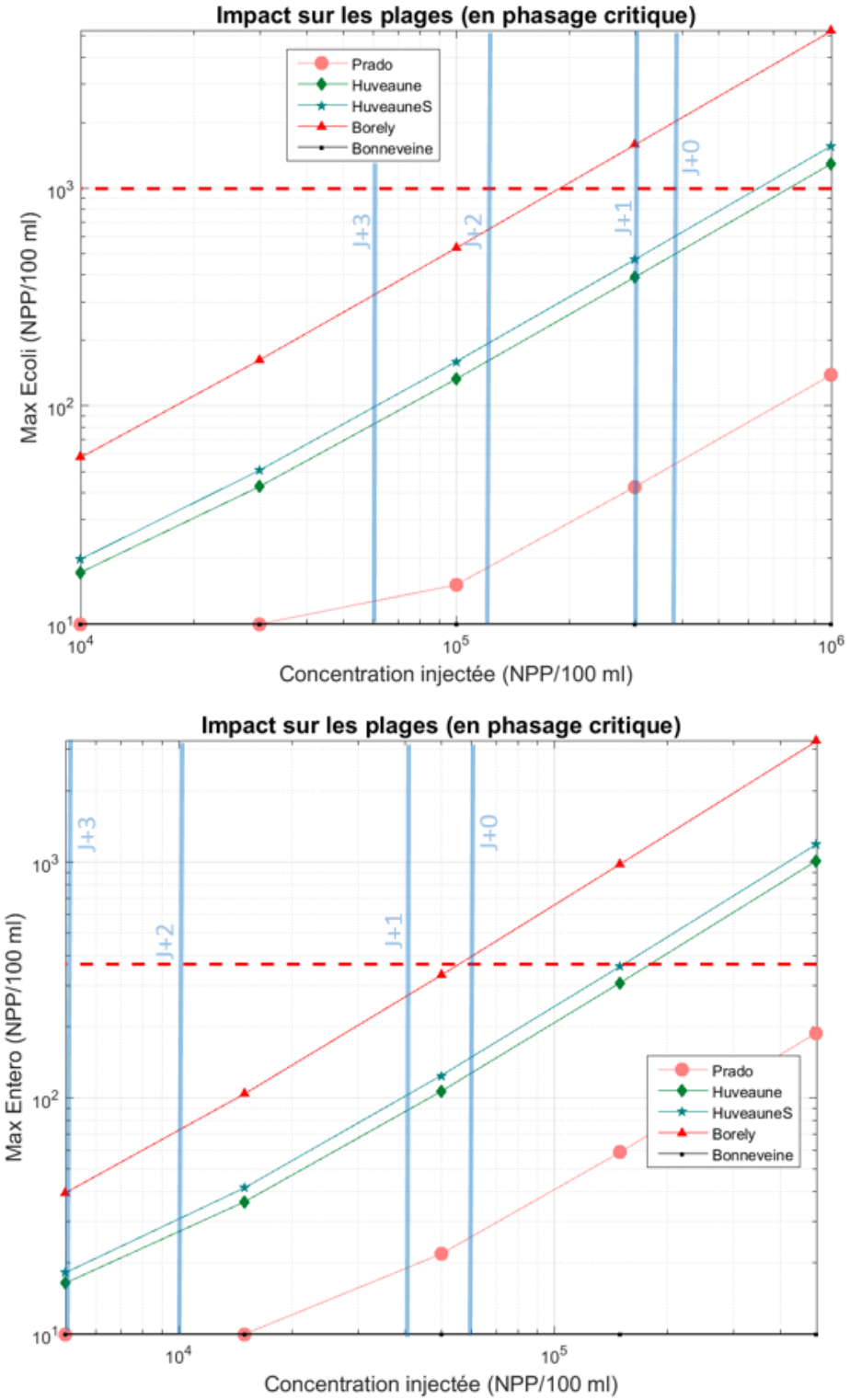


Figure 39 : Concentrations maximales en E.Coli et Entérocoques obtenues sur les points plages en fonction des concentrations injectées à l'exutoire du ruisseau de Bonneveine.



Dans les conditions de forçage du modèle (critiques pour la plage de l'Huveaune), on constate que c'est surtout la plage de Borely qui peut être fortement impactée par le ruisseau de Bonneveine. **D'après le modèle, des dégradations significatives peuvent également être observées sur la plage de l'Huveaune, mais uniquement pour des concentrations injectées à l'exutoire du ruisseau qui sont très importantes. En pratique, dans les conditions de forçage considérées, il est alors possible mais peu probable que le ruisseau de Bonneveine puisse contribuer significativement au phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune.**

4.5.3 Impact des eaux résiduelles de la rivière Huveaune

La stratégie employée pour caractériser l'impact potentiel des eaux résiduelle de la rivière Huveaune sur les plages situées dans la zone d'étude est différente que celle présentée précédemment. Ici, la première étape a d'abord été de déterminer quel était le flux bactériologique à injecter dans la rivière (en amont du pont Borely) afin d'obtenir constamment des concentrations de l'ordre de 2.10^4 NPP/100 ml en E.Coli et 10^4 NPP/100 ml en Entérocoques au niveau du pont Borely. Ces concentrations sont celles mesurées en moyenne à j+1 en ce point. Elles peuvent cependant être ponctuellement mesurées sur les jours suivants. Une fois le flux bactériologique à injecter dans la rivière déterminé, le modèle hydrodynamique, toujours forcé par la marée et par la condition critique de vent identifiée (260° et 5 m/s), a permis de représenter les échanges entre les eaux résiduelles de la rivière et la mer. La Figure 40 montre alors les champs de concentration en E. Coli et Entérocoques à un instant critique pour la plage de l'Huveaune. Conformément à ce qui a été mesuré pendant les campagnes, on observe bien un gradient de concentration entre le pont Borely, plus chargé, et l'embouchure de la rivière. La Figure 41 résume quant à elle les concentrations bactériologiques obtenues sur les différentes plages aux instants les plus critiques.

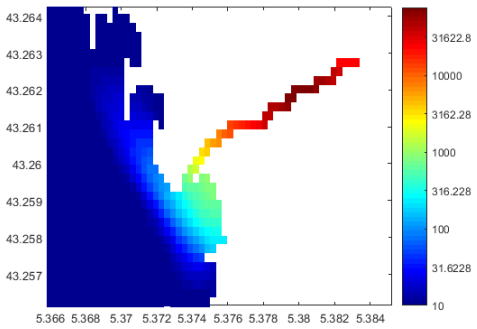
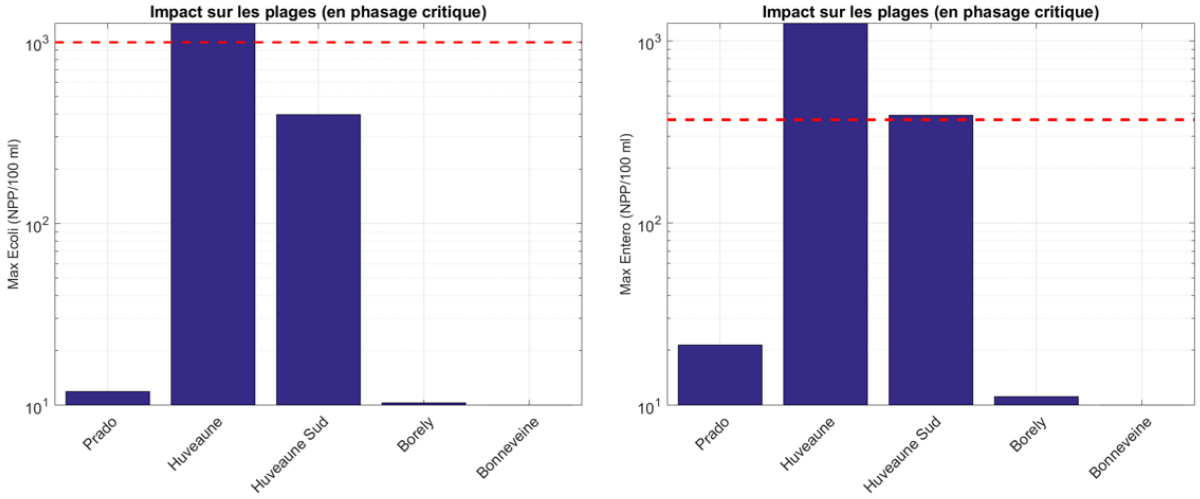


Figure 40 : Champ de concentration en E.Coli (en NPP/100 ml) à un instant critique pour la plage de l'Huveaune pour une répartition des charges dans la rivière représentative de j+1.

Figure 41 : Impact des eaux résiduelles de la rivière Huveaune (pour une répartition des concentrations dans la rivière représentative de la situation moyenne à j+1) sur les plages aux instants les plus critiques



Dans les hypothèses de la simulation, le modèle prévoit un impact significatif sur la plage de l'Huveaune, alors qu'aucun signal de dégradation n'est observé sur les autres plages. On rappelle que les conditions de vent utilisées en forçage sont critiques pour la plage de l'Huveaune et que les résultats ne veulent donc pas dire que les eaux résiduelles ne peuvent pas apporter de la dégradation sur les autres plages. La considération des vagues pourrait également contribuer à une plus large dissipation du panache de l'Huveaune, et donc à un impact plus marqué sur les autres plages. **Etant donnée la répartition des concentrations bactériologiques dans la rivière propre à cette simulation (moyennes à j+1), et au regard des valeurs mesurées au cours des campagnes, il semble que les eaux résiduelles de la rivière puissent contribuer à la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune pendant quelques jours (3 à 4) à la suite d'un épisode de pluie significatif. En revanche, vu la dynamique moyenne de décroissance des concentrations dans la rivière assez régulière, il**

paraît plus compliqué que la rivière contribue au phénomène de persistance et de remontée sur du plus long terme.

4.6 Bilan modélisation

La phase de modélisation présentée dans cette partie avait pour but d'évaluer la contribution potentielle des eaux résiduelle de la rivière Huveaune, du ruisseau de Bonneveine, et du DO Prado (et du collecteur 18 bis), au phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune. On rappelle que dans cette optique, les conditions de vent retenues pour le forçage du modèle étaient particulièrement critiques pour la plage de l'Huveaune. Les concentrations bactériologiques obtenues sur les autres plages en sortie des simulations auraient alors pu être nettement plus marquées sous d'autres conditions. Le tableau suivant propose une synthèse des résultats issus de cette étape de modélisation.

Tableau 17 : Impact potentiel des différentes sources sur les plages

Source =>	**Rivière Huveaune**	**DO Prado + col 18 bis**	**Ruisseau Bonneveine**
Prado			
Huveaune	~ 3 jours	> 4 jours	
Huveaune Sud	~ 3 jours	> 4 jours	
Bonneveine			
Borely			~ 3 jours

En vert, aucun impact. En jaune, impact possible pour les plus fortes concentrations injectées. En orange, impact confirmé par le modèle (affichage de la durée estimée de l'impact à la suite d'un épisode de pluie).

Les conclusions qui peuvent être tirées de la modélisation numérique sont les suivantes :

- Les eaux stagnantes du DO Prado peuvent effectivement contribuer au phénomène de persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune sur une durée potentiellement longue. En revanche, on ne peut pas affirmer qu'elles ne pourraient pas apporter de la dégradation sur les autres plages sous certaines conditions océano-météorologiques.
- Il semble peu probable que l'eau stagnante dans le ruisseau de Bonneveine contribue à la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune. L'apport d'une dégradation sur la plage de Borely pendant plusieurs jours à la suite d'un épisode de pluie est par contre envisageable d'après les résultats. Encore une fois, il est possible que les autres plages soient impactées plus fortement sous d'autres conditions océano-météorologiques.
- L'eau qui stagne dans la rivière Huveaune pourrait dégrader la plage de l'Huveaune pendant plusieurs jours à la suite d'un épisode de pluie significatif. A priori, la durée de l'impact serait cependant plus faible que celle liée au DO Prado (dans lequel la persistance de la dégradation est très importante). Aucun impact n'est en revanche visible sur les autres plages, ce qui ne veut pas dire que cela n'est pas possible sous d'autres conditions de forçage.

5 PHASE 3 : PROPOSITIONS

Le DO Prado étant identifié comme la source la plus probable de persistance des épisodes de pollution, la réflexion sur les solutions se sont concentrées sur cette source.

5.1 Isolement du DO Prado

5.1.1 Solution sans pompage

Il serait intéressant de pouvoir isoler le volume d'eau restant dans le déversoir du Prado dès la fin d'un épisode pluvieux. Cela permettrait de supprimer une source de pollution sanitaire dans le plan d'eau de la plage de l'Huveaune. L'installation d'une vanne motorisée disposée sur chacun des deux exutoires (mer et Huveaune) pourrait répondre à cette problématique. Ces actionneurs, fermés par temps sec, pourraient être ouverts pendant un épisode pluvieux afin de conserver la capacité d'évacuation du déversoir du Prado.

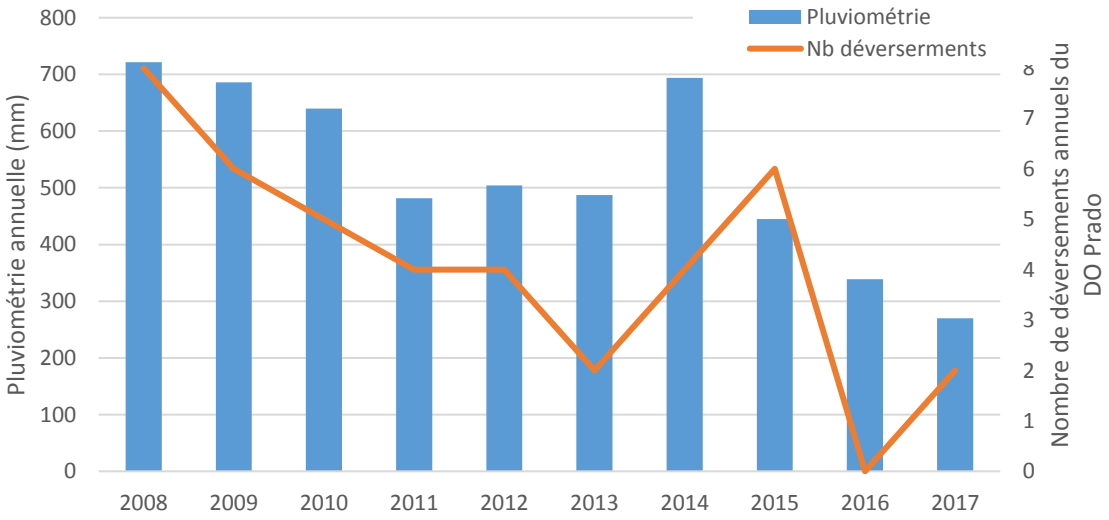
Ces aménagements sont estimés à 1,2 M€ HT.

Le principe de cette solution impose de conserver les vannes motorisées fermées en permanence afin d'isoler les eaux chargées contenues dans la conduite de déversement et à ne les ouvrir qu'en cas d'ouverture des clapets du déversoir de l'Emissaire 1.

Cependant, plusieurs paramètres concourent à rendre difficile la fiabilisation du fonctionnement de ces vannes :

- Les ouvertures du DO Prado n'interviennent que quelques fois par an comme l'illustre la figure ci-dessous. En plus de cela, il n'est pas envisageable de programmer périodiquement des manœuvres de vannes au risque de rejeter de la pollution en mer. Il est donc compliqué de mettre en action fréquemment ces équipements alors que cela est nécessaire pour en assurer le bon fonctionnement.
- La position de la vanne à l'exutoire du DO Prado qui l'expose à de très fortes contraintes mécaniques en cas de tempête.

Figure 42 : nombre de déversements annuels du DO Prado.



L'évacuation des eaux de l'Emissaire 1 par le DO Prado étant indispensable à la sécurité de fonctionnement du réseau, cette solution n'est donc pas préconisée.

5.1.2 Solution avec pompage

Afin d'éviter de devoir conserver les vannes d'isolement fermées, on peut envisager d'ajouter à cette solution un pompage évacuant les eaux chargées juste après le déversement. Suite à la vidange de la conduite de déversement, les vannes d'isolement pourraient être rouvertes et maintenues dans cette position en permanence.

Pour assurer la vidange des eaux stagnantes, une station de pompage refoulant jusqu'à la station de la Muette via une canalisation DN250 peut être aménagée au niveau de l'exutoire du DO Prado.

Cette solution pose néanmoins les problématiques suivantes :

- Les vannes n'étant pas parfaitement étanches, des intrusions d'eau de mer vont intervenir en en fin de vidange des canalisations et vont créer des problèmes de salinité au niveau de la station d'épuration.
- Les équipements de pompage seront en permanence en eau de mer et seront en conséquence très rapidement dégradés, avec le risque qu'ils soient indisponibles immédiatement après les aux épisodes de déversements.

Ces aménagements complémentaires, pompage et conduites de refoulement, sont estimés à 1,0 M€ HT portant ainsi le coût global à 2,2 M€ HT.

5.2 Prolongation du DO Prado

Une prolongation du DO Prado de 500 à 1000 m pourrait être envisagée afin d'éloigner le rejet des plages.

Outre son coût prohibitif (de 15 à 25 M€ HT) et les difficultés réglementaires pour l'obtention des autorisations pour sa réalisation, cette solution est potentiellement inefficace dans des conditions de vent d'ouest qui rabattrait la nappe vers les plages. Elle n'a donc pas été étudiée plus en détail.

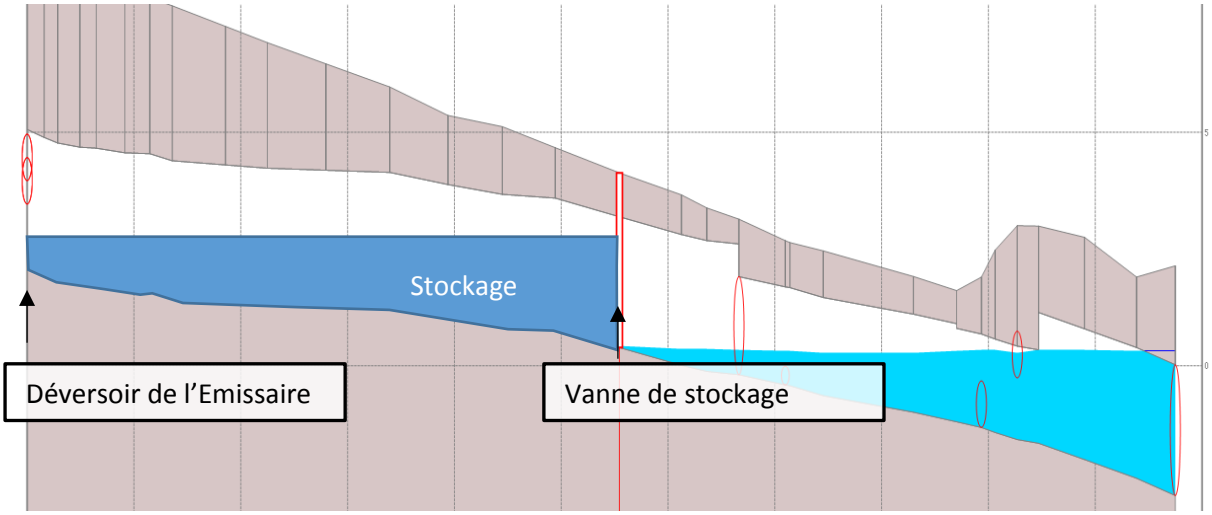
5.3 Stockages

Deux possibilités de stockage permettant de limiter les rejets au niveau de DO Prado été envisagées :

5.3.1 Stockage dans la conduite

La possibilité d'un stockage dans la partie amont du DO Prado a été étudiée. L'installation d'une vanne motorisée disposée en travers de la conduite de déversement permettrait de stocker environ 4 000 m^3 dans la conduite de déversement.

Figure 43 : Stockage dans la partie Amont du DO Prado



Comparée à la solution d'isolement du DO Prado étudiée précédemment, cette solution présente l'avantage de ne pas avoir d'équipements en permanence dans l'eau de mer et de pouvoir manœuvrer la vanne quotidiennement pour en assurer le bon fonctionnement. En revanche, elle peut représenter un risque pour la sécurité du réseau en cas de dysfonctionnement qui ne permettrait pas sa réouverture.

La pertinence du volume stockable a été étudiée au regard des volumes déversés au niveau du déversoir de l'Emissaire 1. Entre 2000 et 2017, 80 fonctionnements de ce déversoir ont été recensés dont 29 (36%) seulement concernaient un volume inférieur à 4 000 m^3.

On peut noter que le bassin Ganay, entré récemment en fonctionnement, a, par son effet d'abaissement de la ligne d'eau dans l'Emissaire 1, une action de réduction des déversements de faible volume mais ne permet pas de réduire qu'à la marge les volumes déversés pour les évènements les plus importants.

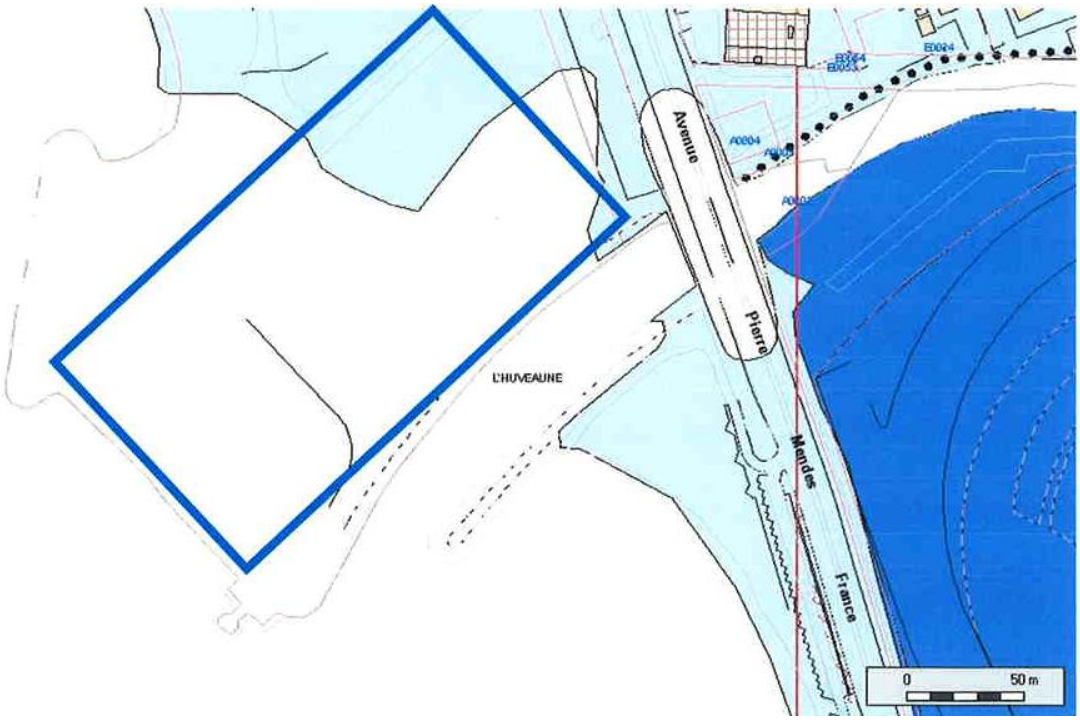
Cette solution ne présenterait pas donc pas d'intérêt pour environ les deux tiers des déversements.

Cet aménagement est estimé à 600 k€ HT.

5.3.2 Bassin de stockage

Une des solutions peut consister à supprimer les rejets du DO Prado en réalisant un stockage à l'aval de cette conduite de déversement. Cette solution a déjà été étudiée dans l'étude réalisée par Ginger en septembre 2011 sur les possibilités de dépollution du SO Prado. Ce stockage serait possible en rive droite de l'embouchure de l'Huveaune.

Figure 44 : emplacement du bassin de stockage proposé dans l'étude Ginger de 2011



L'analyse des 80 fonctionnements du déversoir de l'Emissaire 1 entre les années 2000 et 2017 montre qu'un volume de 50 000 m^3 équivalent au bassin Ganay serait nécessaire pour traiter 80 % des déversements du déversoir.

Comme pour l'aménagement de stockage dans la conduite, le bassin Ganay n'aura qu'un impact marginal sur ces estimations.

Cet aménagement est estimé à 50 M€ HT.

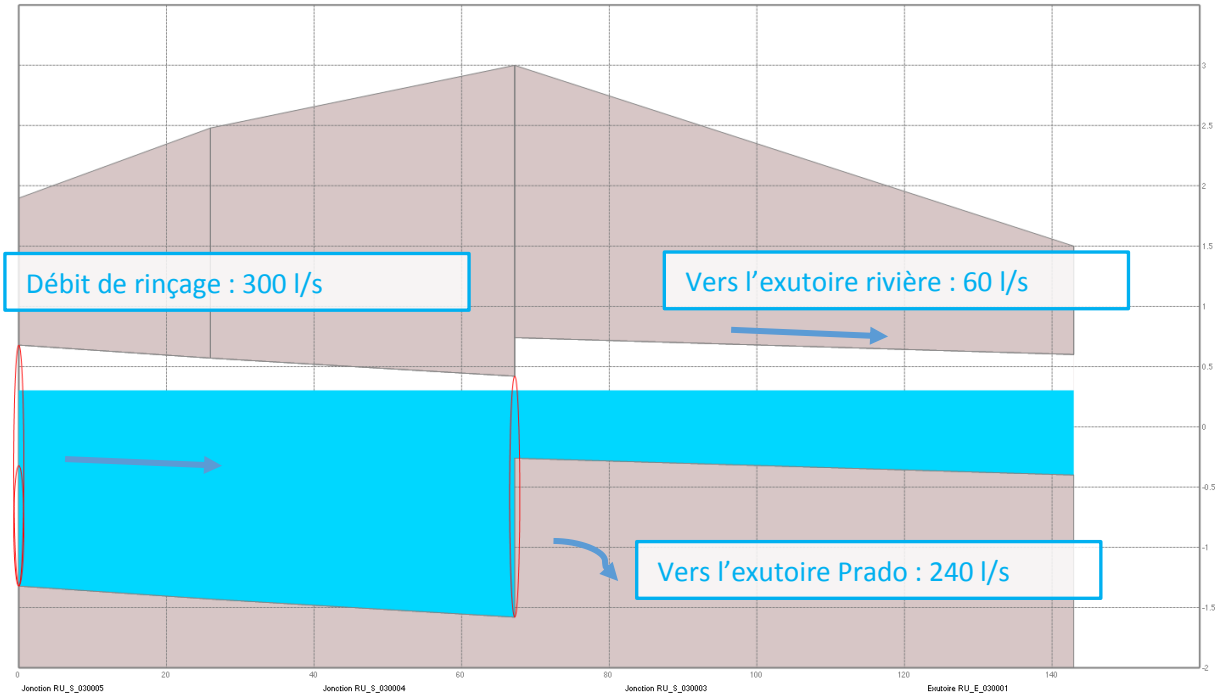
5.4 Rinçage du DO

Le principe de l'aménagement proposé est d'installer dans l'ouvrage pluvial actuel une pompe permettant, à partir de l'eau pompée dans l'Huveaune, de renouveler les eaux stagnant dans la partie toujours en eau du DO Prado.

Le fil d'eau de la canalisation pluviale est situé à une cote supérieure à celle de la canalisation du DO Prado. Ceci permet d'arriver en surverse dans cette canalisation au niveau de la séparation du DO en deux branches et de rincer ces deux branches. Un pompage de 300 l/s permettrait de renouveler l'eau de la conduite en 2 h.

Dans la configuration actuelle, l'évacuation des eaux pompées se ferait en partie par le DO Prado en mer mais aussi en partie par le DO Prado en rivière, juste à côté du point de pompage. En raison du seuil vers entre le DO Prado et la branche se rejetant en rivière (cf Figure 47), la répartition des débits s'établirait à 240 l/s vers la mer et 60 l/s vers l'Huveaune.

Figure 45 : Profil en long de l'aval de la branche rivière du DO Prado



A l'heure actuelle, la canalisation pluviale peut être sollicitée pour évacuer les eaux du déversoir pour des pluies importantes. L'installation du pompage dans cette canalisation aura donc un impact sur la ligne d'eau dans le DO Prado pour des pluies importantes (cf § 5.4.1.1).

Cette solution a également pour avantage de favoriser le renouvellement des eaux de l'embouchure de l'Huveaune. En considérant une profondeur moyenne de 1 m entre l'embouchure et la prise d'eau, le volume stagnant dans l'embouchure est estimé à environ 5 400 m^3 qui seraient renouvelés en 5 h.

L'aménagement serait exploité de la manière suivante :

- Purge immédiate suite à un déversement pour abaisser la charge dans la conduite de déversement.
- Périodiquement, en conditions favorables, recirculation des eaux pour conserver l'abattement de la charge dans le DO.

Le coût de cet investissement est estimé à 600 k€ HT.

Figure 46 : Principe de l'aménagement de rinçage du DO Prado

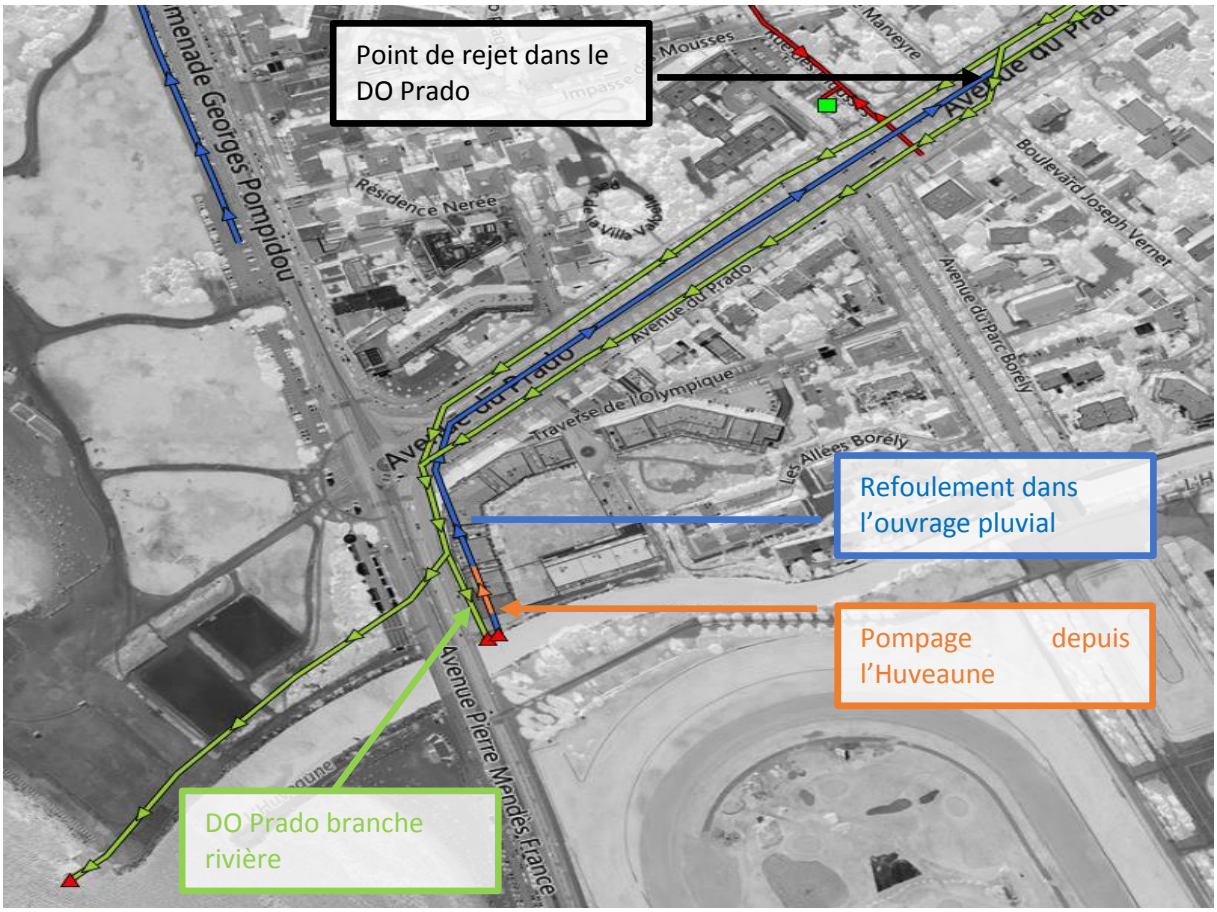
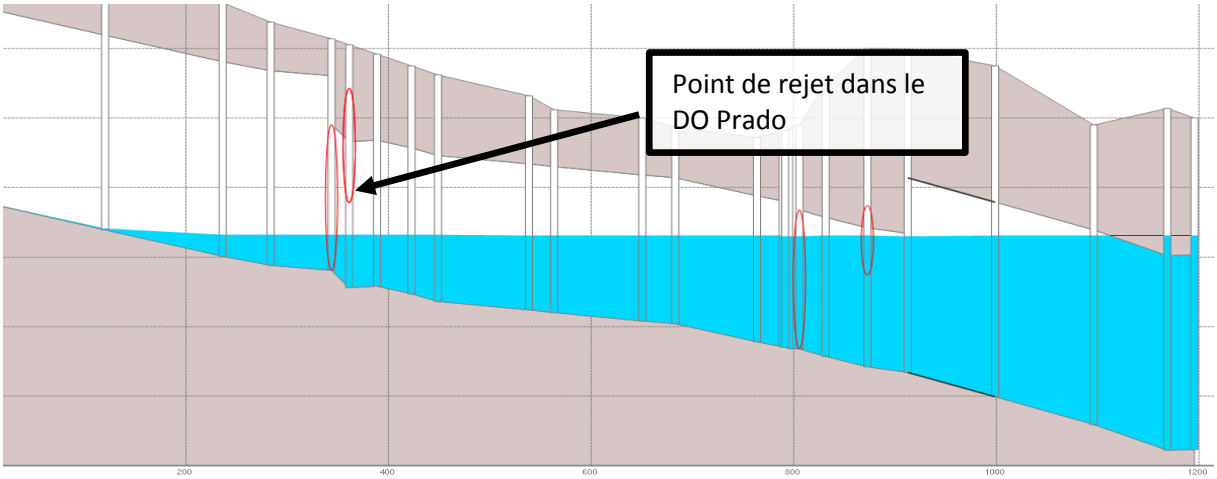


Figure 47 : Profil en long de l'aval du DO Prado



5.4.1 Modélisation de la solution de rinçage

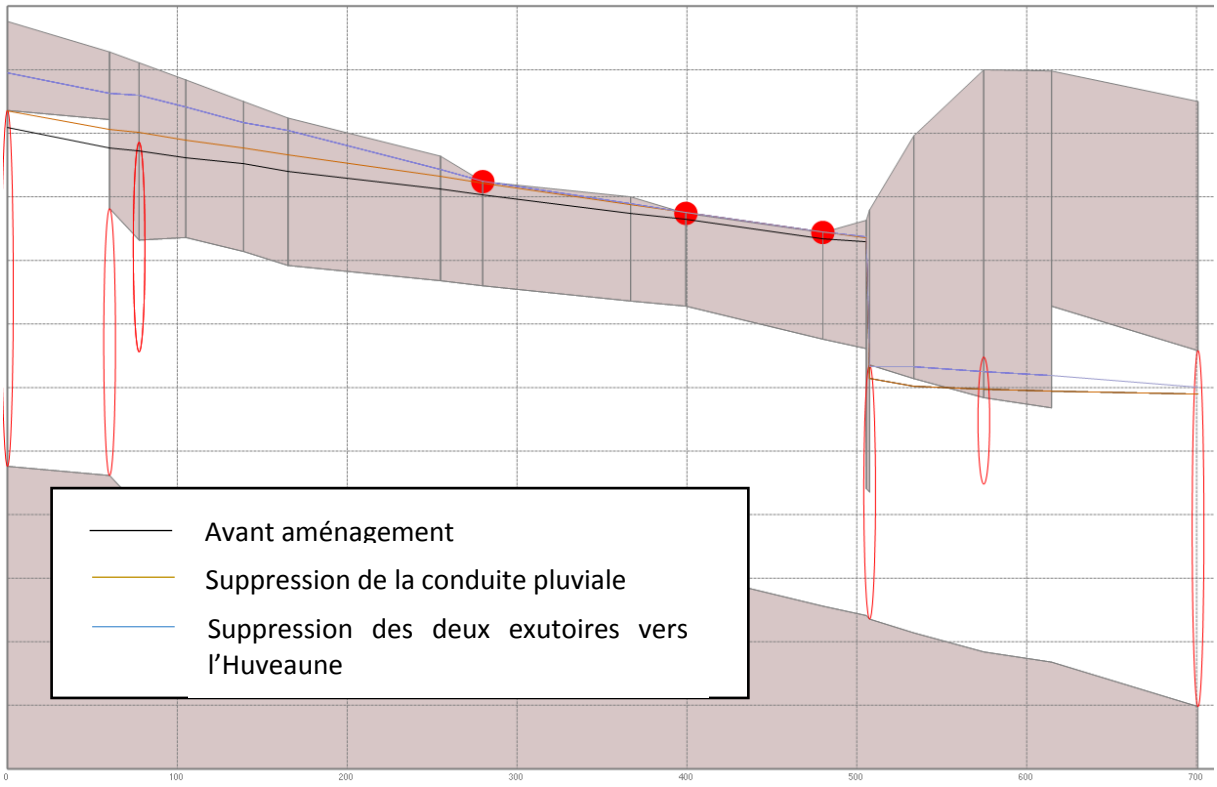
5.4.1.1 Modélisation de l'impact sur le fonctionnement du DO Prado

La modélisation du réseau a été utilisée afin :

- De caractériser l'impact de la suppression du déversement par la conduite pluviale (en raison de l'installation du pompage dans celle-ci),
- D'étudier la possibilité de supprimer en plus la branche rivière du DO, ce qui permettrait d'éviter le pompage en boucle d'une partie des eaux (retour vers l'Huveaune estimé à 60 l/s).

La figure suivante montre les résultats de ces modélisations.

Figure 48 : Profil en long de l'aval du DO Prado



Il apparait que :

- La suppression de la conduite pluviale provoque une hausse de la ligne d'eau de 5 cm jusqu'à atteindre le TN, à la limite du débordement,
- La suppression de la branche du déversoir en rivière provoque le débordement du déversoir sur la chaussée avec un volume débordé estimé 1 100 m^3.

La suppression de la branche du déversoir en plus de la conduite pluviale n'est donc pas préconisée. En revanche la seule suppression de la conduite pluviale est envisageable.

5.4.1.2 Modelisation de l'impact sur le milieu

Afin de déterminer quel est le moment le plus opportun pour une purge de l'eau qui stagne dans le DO Prado, des simulations ont été réalisées à l'aide du modèle marin.

L'eau qui est pompée pour purger le DO Prado provient de la rivière Huveaune au niveau de son exutoire. Il convient donc d'attendre que les concentrations bactériologiques redescendent à des valeurs acceptables dans la rivière si l'on veut rincer le DO avec une eau suffisamment propre. En revanche, plus l'on attend avant de réaliser la purge, plus l'eau résiduelle dans le DO Prado, potentiellement très dégradée, risque d'apporter une pollution significative sur la plage de l'Huveaune

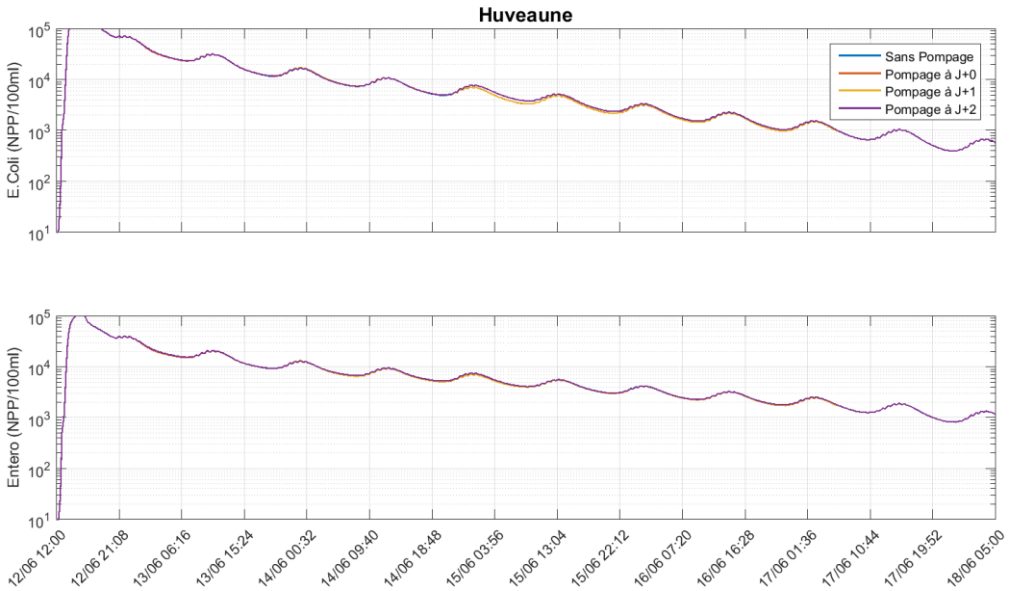
où les concentrations bactériologiques étaient en cours de diminution. Des simulations ont alors été réalisées pour évaluer l'impact d'une purge du DO Prado à différents moments. Les simulations s'articulent de la manière suivante :

- **Etape 1 :** Initialisation de la simulation avec un forçage par la marée et une condition critique de vent (260°, 5 m/s)
- **Etape 2** : Représentation des rejets caractéristiques d'un épisode pluvieux significatif sur les principales sources de la zone
    - Huveaune : 500 000 m^3 à $2{,}5.10^5$ NPP/100 ml en E. Coli et $1{,}25.10^5$ NPP/100 ml en Entérocoques
    - DO Prado : 50 000 m^3 à 10^6 NPP/100 ml en E. Coli et 5.10^5 NPP/100 ml en Entérocoques
    - Bonneveine : 25 000 m^3 à 10^5 NPP/100 ml en E. Coli et 5.10^4 NPP/100 ml en Entérocoques
- **Etape 3** (variable en fonction des simulations) :
    - Simulations avec purge
        - Attente de 6 h, 30 h, ou 54 h après la fin des rejets
        - Représentation de la purge (sortie au niveau de l'exutoire mer) : injection à l'exutoire mer du DO Prado des 2 000 m^3 d'eau stagnante contaminée avec une concentration de 10^5 NPP/100 ml en E. Coli et de 5.10^4 NPP/100 ml en Entérocoques et un débit de purge de 0,3 m^3/s
        - Evolution des concentrations bactériologiques sur les jours qui suivent la purge
    - Simulation sans purge : évolution des concentrations bactériologiques sur les jours qui suivent les rejets initiaux des différentes sources

5.4.1.2.1 Purge suite à un déversement

La comparaison de l'évolution des concentrations bactériologiques sur la plage de l'Huveaune pour les différentes simulations est visible sur la figure suivante. Les résultats sur les autres plages sont disponibles en Annexe 7.

Figure 49 : Evolution, avec et sans purge dans le DO Prado, des concentrations bactériologiques sur la plage de l'Huveaune



D'après les résultats du modèle, à la suite d'un épisode pluvieux significatif, le moment auquel la purge est réalisée n'a pas beaucoup d'importance d'un point de vue de son impact direct sur les plages. En

effet, il semble que la dégradation induite par une purge sur la plage soit négligeable, et ce quel que soit le moment auquel elle est faite.

Bien entendu, ces résultats reposent sur des hypothèses simplificatrices, notamment que les concentrations bactériologiques sont constantes à l'intérieur du DO, et il convient alors de les nuancer. Pour certaines campagnes, la décroissance bactériologique mesurée dans le milieu était notamment plus rapide que celle obtenue dans ces simulations. Dans ces cas-là, les purges pourraient avoir un impact plus important sur les plages. Une étude plus poussée serait nécessaire pour étudier la solution de purge du DO Prado plus en détails.

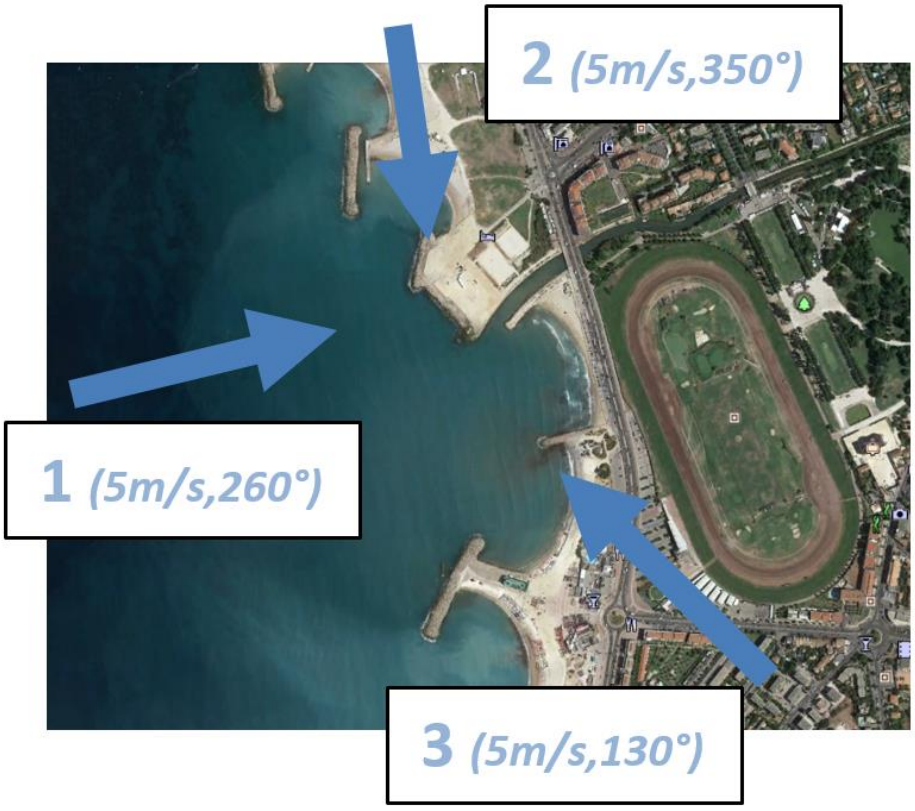
5.4.1.2.2 Purges par temps sec

Le modèle marin a également été utilisé pour caractériser l'impact d'une purge par temps sec en fonction des conditions météorologiques.

Trois conditions ont été testées :

1. Vent de 260° à 5 m/s
2. Vent de 350° à 5 m/s
3. Vent de 130° à 5m/s

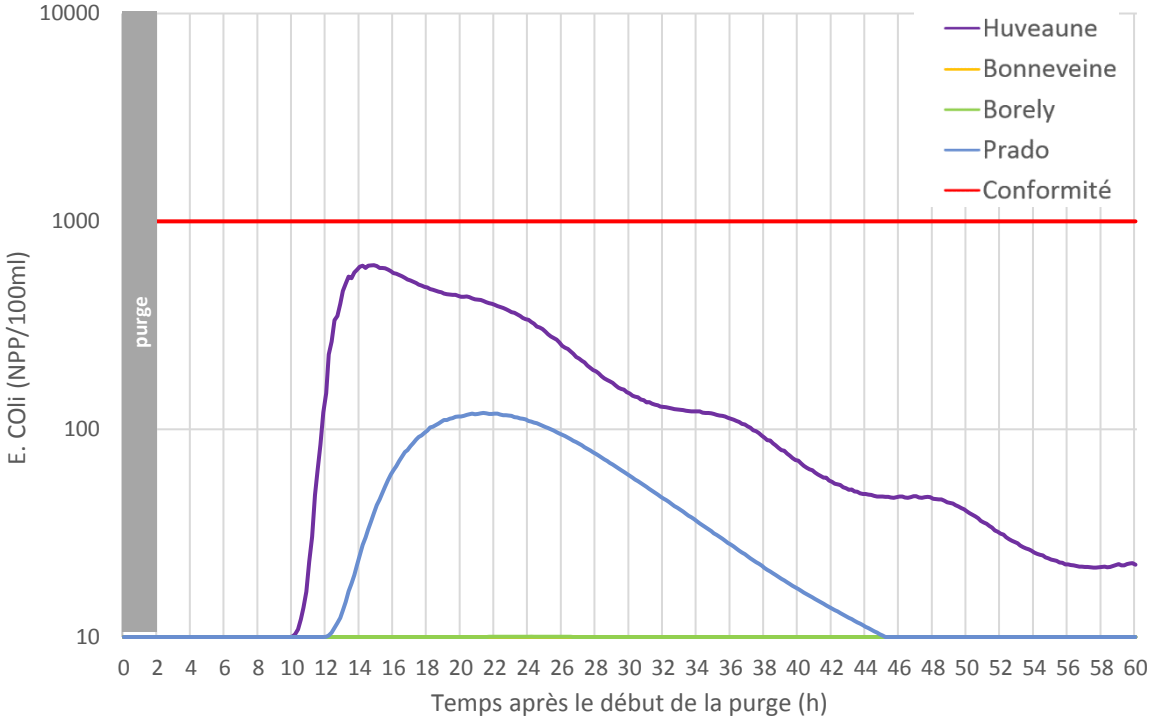
Figure 50 : 3 conditions météorologiques pour lesquelles l'impact d'une purge par temps sec a été simulée

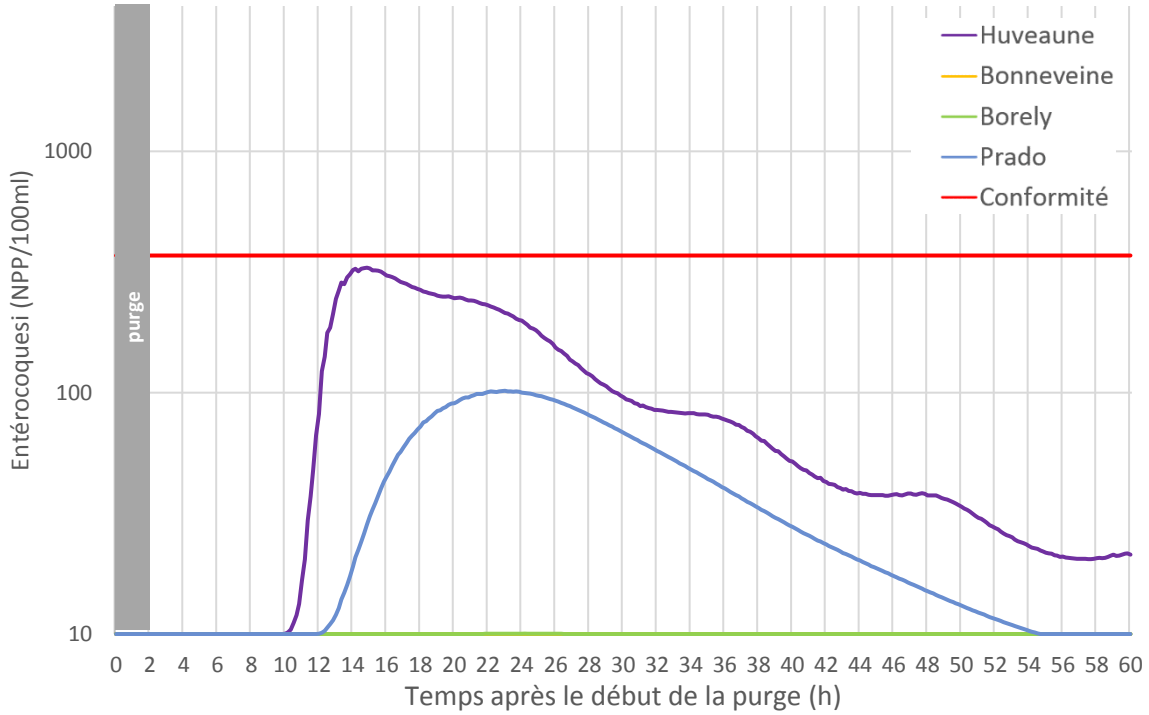


La durée de la purge est fixée à 2h, ce qui permet en théorie de renouveler l'ensemble des eaux stagnantes dans le DO.

Vent de 260° à 5 m/s

Figure 51 : Impact sur les plages (E. Coli et Entérocoques) dans le cas d'une purge par vent de 260°

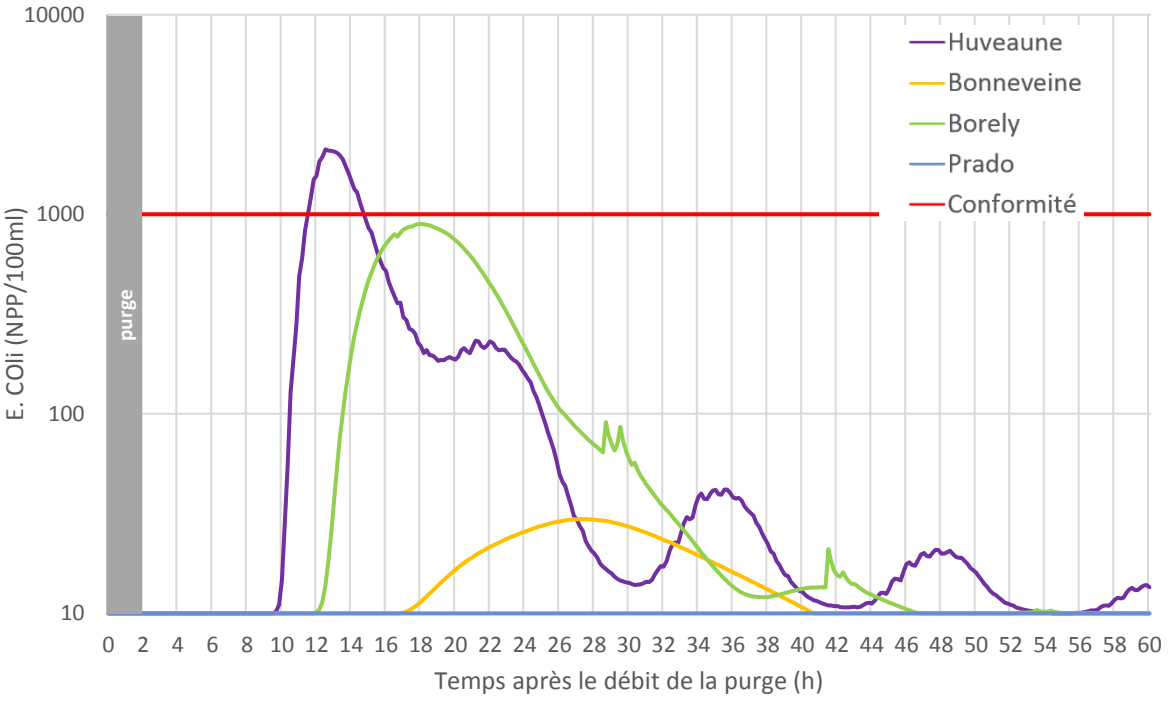


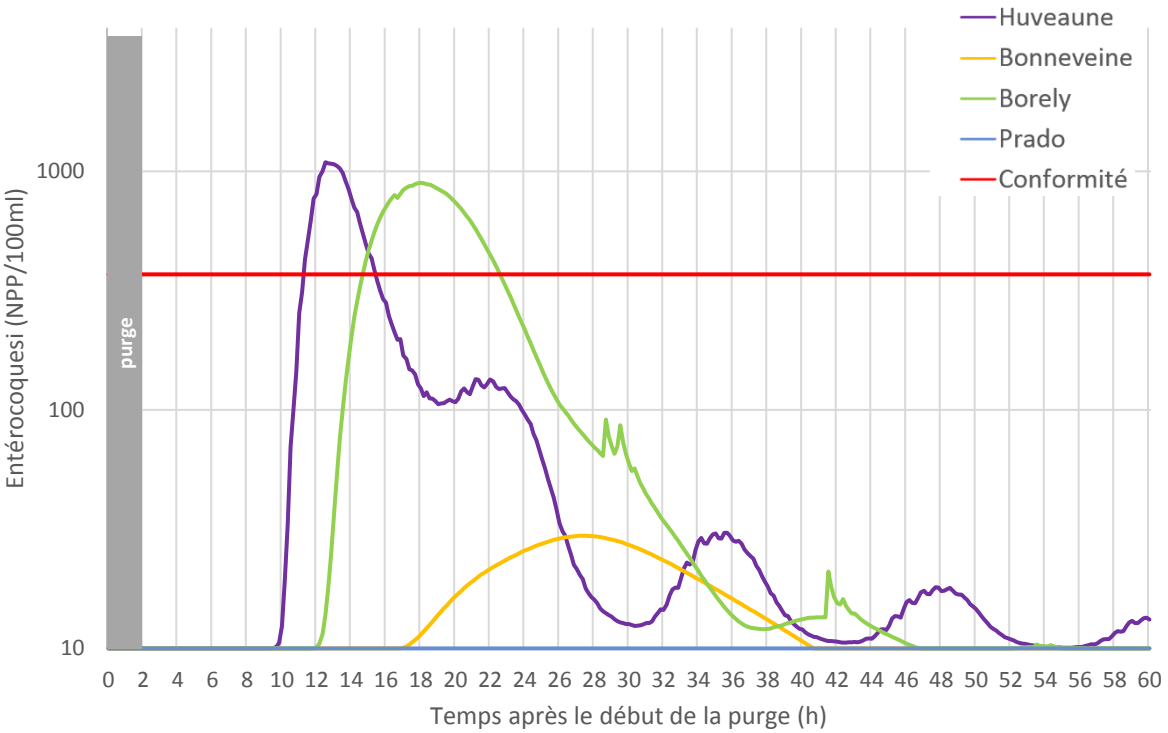


Dans ces conditions météorologiques, on observe un impact significatif sur les plages de l'Huveaune et du Prado avec des concentrations en E Coli et en Entérocoques qui s'approchent de la limite de conformité.

Vent de 350° à 5 m/s

Figure 52 : Impact sur les plages (E. Coli et Entérocoques) dans le cas d'une purge par vent de 350°

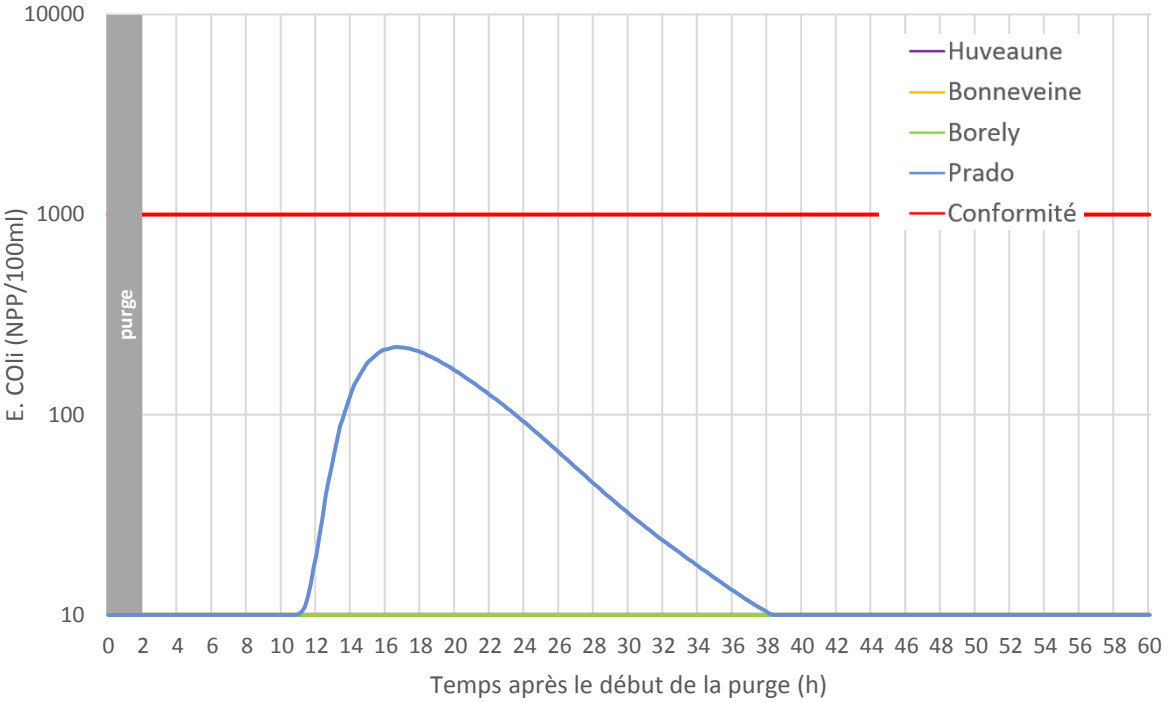


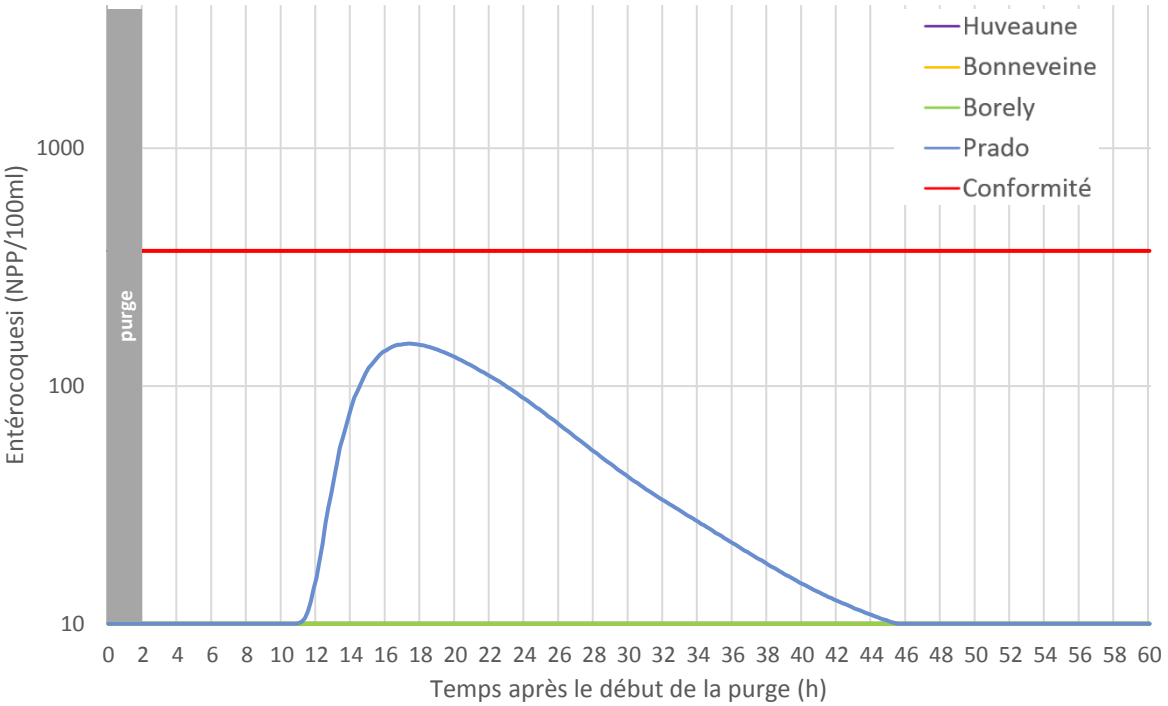


Dans ces conditions météorologiques, on observe un impact significatif sur les plages de l'Huveaune et Borely avec des concentrations en E. Coli et en Entérocoques qui dépassent pendant 14 h la limite de conformité.

Vent de 130° à 5 m/s

Figure 53 : Impact sur les plages (E. Coli et Entérocoques) dans le cas d'une purge par vent de 130°





Dans ces conditions météorologiques, on observe un impact modéré sur la plage du Prado avec des concentrations maximum en E. Coli et en Entérocoques respectivement de 200 et 100 NPP/100 ml.

6 CONCLUSION

Les investigations réalisées lors de la **première phase** de cette étude ont permis :

- D'établir que la seule source de pollution potentiellement impactante en temps sec ou par temps de petite pluie pour le milieu marin semble être les mauvaises connexions d'eaux usées (excluant ainsi les sédiments et les nappes).
- Pour les épisodes pluvieux, de relativiser l'apport en charge bactériologique de l'éventuelle remise en suspension des sédiments du lit de l'Huveaune.
- De valider la contribution potentielle de la rivière Huveaune, du ruisseau de Bonneveine, et du DO Prado (et canalisation du collecteur 18 bis) à ce même phénomène de persistance.

En revanche, certains phénomènes qui avaient été identifiés comme jouant potentiellement un rôle dans la persistance de la dégradation sur la plage de l'Huveaune n'ont pas pu être validés par les campagnes, à savoir :

- La remise en suspension de sédiments,
- la surverse du lac Borely et les exutoires pluviaux,
- le retour du panache de l'Huveaune (qui aurait notamment suggéré des concentrations bactériologiques plus fortes au point Mer Large Huveaune qu'au point Mer Proche Huveaune à certains moments).

Les modélisations réalisées lors de la **deuxième phase** montrent que dans les conditions les plus défavorables, la source constituée par le DO Prado est susceptible de provoquer le phénomène de persistance des épisodes de pollution de la plage de l'Huveaune.

En réponse à ce diagnostic, plusieurs solutions ont été étudiées dans la **troisième phase** de l'étude :

- Stockage dans la conduite de déversement du DO : le volume disponible est insuffisant pour les 2/3 des déversements du DO Prado.
- Stockage en bassin : le bassin nécessaire pour stocker 80 % des déversements est d'un volume équivalent au bassin Ganay et couterait donc environ 50 M€ HT.
- Prolongation du DO Prado : potentiellement inefficace sous les conditions de vent majoritaires, celui-ci est estimé à environ 15-25 M€ HT.
- Isolement du DO Prado par des vannes : cette solution, qui répond à la problématique, semble difficile à fiabiliser et peut représenter un risque pour la sécurité du réseau.
- Rinçage du réseau : seule cette solution, d'un coût estimatif en investissement de 600 k€ HT, semble constituer un compromis prix / efficacité / fiabilité acceptable. Cette solution permettrait également de favoriser le renouvellement des eaux dans l'embouchure de l'Huveaune qui peuvent également participer à dégrader les eaux de la plage de l'Huveaune. L'exploitation de cet ouvrage nécessitera un pilotage en fonction des conditions météorologiques et en fonction de la charge bactériologique mesurée dans le DO Prado.

7 ANNEXES