

Ifremer

Contrat n° 06/5 210 752

**ETUDE DE VALORISATION
DE BASE DE DONNEES QUALITE DES EAUX
DANS LE BASSIN MARENNES OLERON
ET LE BASSIN DE LA CHARENTE.**

Décembre 2006



 **Eaucéa**
Conseil Études Aménagement
Société de Services pour l'Eau et l'Environnement

SOMMAIRE

RESUME.....	3
1. OBJET DE L'ETUDE	4
2. PRESENTATION DES DONNEES ET HYPOTHESES	4
2.1. Deux stations contrastées	4
2.2. Présentation des données	5
2.3. Estimation des débits du fleuve Charente à l'estuaire : hypothèses	5
2.4. Quelques ordres de grandeur	7
3. LA SALINITE.....	8
3.1. La station de Boyard	8
3.2. La station de Fontenelles	9
1.1.1. <i>Evaluation de l'impact de différents paramètres.....</i>	<i>9</i>
1.1.2. <i>Modélisation de la salinité en fonction du débit de l'estuaire et de la position dans le cycle de marée</i>	<i>19</i>
1.1.3. <i>Les exigences de salinité pour l'ostréiculture</i>	<i>21</i>
4. LES NITRATES.....	22
1.1.4. <i>Evaluation de l'impact de différents paramètres.....</i>	<i>22</i>
1.1.5. <i>Estimation des flux de nitrate à l'estuaire</i>	<i>27</i>
5. LE PHOSPHATE.....	30
6. LE SILICATE	34
7. LA CHLOROPHYLLE A	36
CONCLUSION	39

RESUME

L'objet de l'étude est de décrire les liens principaux entre l'hydrologie de la Charente et les constats qualitatifs dans le bassin de Marennes, ainsi que l'estimation des flux continentaux, sur la base des données des stations de Fontenelles et de Boyard entre 1977 et 2006.

Du fait de l'influence de la marée, il n'est pas possible de mesurer les débits de la Charente dans sa partie aval. Ils ont donc été reconstitués à partir des stations de Saint-Savinien, du pont de Beillant, de Carillon, du Moulin de Chatre, de la Lijardière, de Jarnac, de Vindelle et de Foulpouagne, en fonction de la disponibilité et de la fiabilité des données.

Les mesures à Fontenelles et Boyard ont été réalisées de façon à disposer d'une gamme variée de situations par rapport au coefficient de marée et à la position dans le cycle de marée. L'étude montre une forte sensibilité des paramètres mesurés à la position de la mesure dans le cycle de marée, reflet de la dilution des eaux fluviales dans les eaux marines.

L'étude a permis d'établir une relation entre la salinité à Fontenelles, le débit de la Charente et la position dans le cycle de marée. Cette relation permet d'estimer la salinité moyenne à Fontenelles sur un cycle de marée en fonction du débit de la Charente. Les résultats font apparaître une salinité moyenne de 33 g/l pour un débit de 12 m³/s, soit le DOE de la Charente. La salinité moyenne serait de 34 g/l pour un débit de 8 m³/s.

La chronique de mesures sur les nitrates fait apparaître une nette tendance à la hausse depuis 1977. La concentration moyenne aurait augmenté de 6.4 mg/l entre 1977 et 2006, soit une augmentation de 52% sur la période. Au contraire, on observe une nette tendance à la baisse sur les phosphates, soit une réduction d'environ 46% sur la période.

Il n'a pas été possible d'obtenir une relation fine entre le débit de la Charente et la concentration en nitrates à Fontenelles, en raison de la diversité des facteurs qui jouent sur ce paramètre. Les mesures de nitrates, désinfluencées de la position dans le cycle de marée, ont été replacées dans les chroniques annuelles de débit de la Charente afin de mettre en évidence des effets saisonniers. Le calcul de la droite théorique de dilution a également permis d'estimer les flux entrant à l'estuaire.

Les principaux éléments nutritifs conditionnant le développement des algues et du phytoplancton sont le nitrate, le phosphore et la silice. L'étude ne permet pas de mettre en évidence que l'un de ces 3 éléments puisse représenter un facteur limitant de la production primaire à Fontenelles. L'interprétation est cependant délicate car la chlorophylle entre dans un cycle biologique complexe.

1. Objet de l'étude

L'IFREMER a mobilisé depuis de nombreuses années des analyses d'eau concernant plusieurs paramètres fondamentaux physiques et chimiques en 5 points compris entre l'estuaire de la Charente et le bassin de Marennes Oléron. Ces paramètres mesurés jouent un rôle important dans le fonctionnement écologique du littoral et la production conchylicole. Ils sont en lien étroit avec le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Charente (environ 10 000 km²) dont les paramètres sont encore mal maîtrisés au niveau de l'estuaire.

L'étude doit permettre au travers de corrélations mathématiques de décrire les liens principaux entre l'hydrologie de la Charente et les constats qualitatifs dans le bassin de Marennes, ainsi que l'estimation des flux continentaux.

L'étude a été réalisée sur la base des données des stations de Boyard et de Fontenelles, transmises par l'IFREMER.

2. Présentation des données et hypothèses

2.1. Deux stations contrastées

Pour chaque station, les mesures ont été réalisées en surface et au fond, donnant ainsi une situation contrastée sur 4 points de mesures.

En effet, selon les travaux de l'IFREMER sur le modèle SIAM 3D, parmi tous les fleuves côtiers du bassin, seule la Charente impacte de manière significative le Bassin de Marennes-Oléron.

L'examen du panache de la Charente sous différentes configurations de vents et de débits a montré que dans le Courreau d'Oléron, seule la partie côtière continentale est exposée aux apports de ce fleuve, la côte Oléronnaise étant seulement baignée par des masses d'eau d'origine océanique.

Ainsi, la station de Boyard peut être considérée comme une station témoin hors de l'influence du panache de la Charente.

La station de Fontenelles se situe à l'embouchure de l'estuaire de la Charente. Dans les estuaires, la salinité augmente généralement avec la profondeur. Les eaux maritimes, salées et plus denses, s'écoulent préférentiellement au fond. Le coefficient de marée joue également sur le mélange des eaux maritimes et fluviales : en mortes-eaux, le mélange est limité.

Ainsi, la station de Fontenelles en surface est donc la plus influencée par le régime fluvial. L'analyse sera approfondie sur cette station.



2.2. Présentation des données

Les données des stations de Fontenelles et de Boyard comprennent de 1 à 2 mesures par mois entre 1977 et 2006.

Date	Turbidité Seston (mg/l)	Phosphate
Heure	Turbidité sestm (mg/l)	Carbone
Profondeur en mètres	Turbidité Sesto (mg/l)	Azote
pH	Chlorophyle a	protides
Température de l'eau	Phéopigments	lipides
Salinité	Ammoniac	glucp
Concentration en O2 ml	Nitrite	glucd
Taux de saturation O2 (%)	Nitrate	
Turbidité (NTU)	Silicate	

Paramètres mesurés :

Le choix de la date et de l'heure de la mesure a été raisonné afin d'obtenir une gamme variée de situations par rapport :

- ✓ au coefficient de marée ;
- ✓ à la position dans le cycle semi diurne.

Les résultats de l'étude montre une forte sensibilité des paramètres mesurés à la position de la mesure dans le cycle semi diurne de la marée.

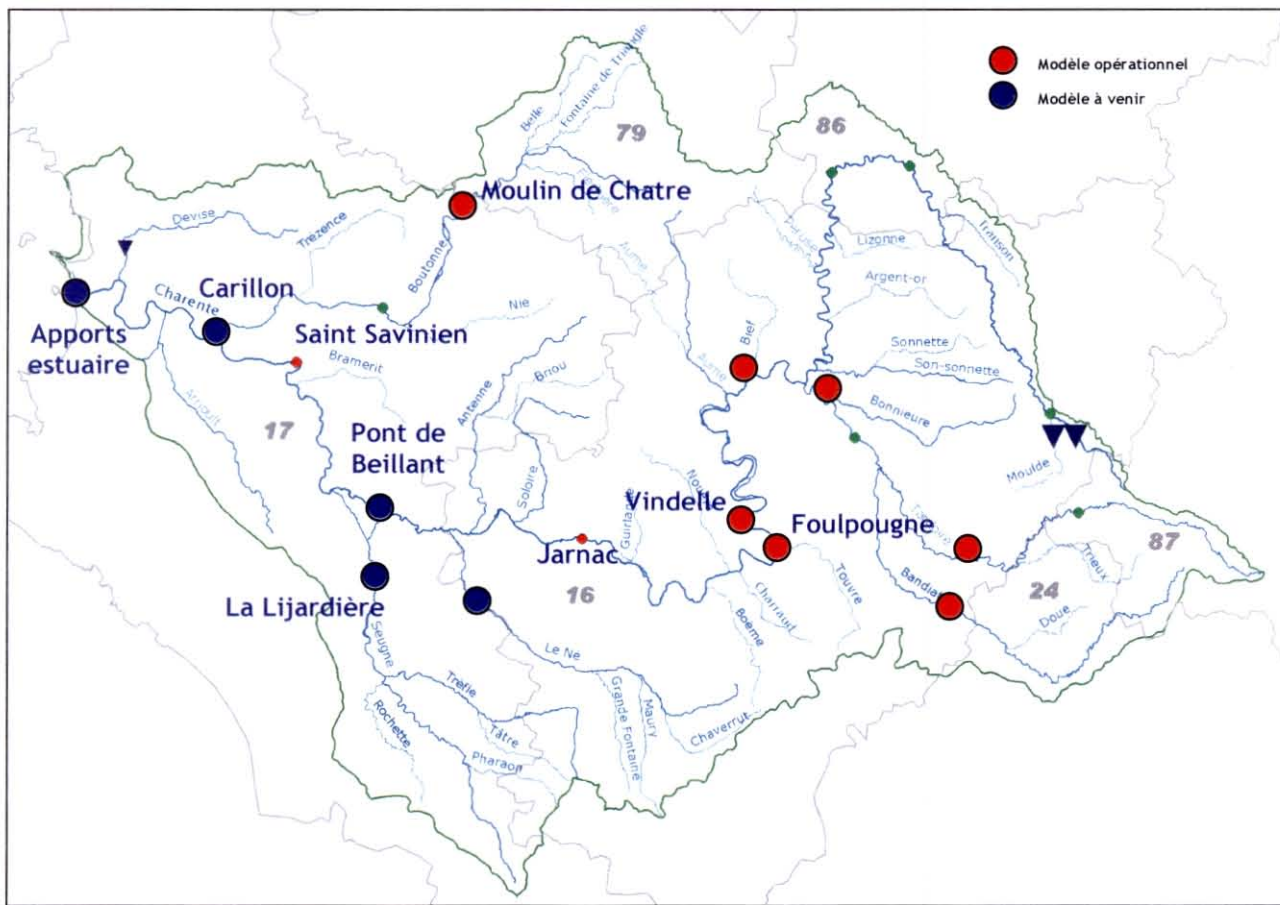
Notons que les données comprenaient des valeurs négatives sur certains paramètres. Elles n'ont pas été prises en compte dans l'étude.

2.3. Estimation des débits du fleuve Charente à l'estuaire : hypothèses

Du fait de l'influence de la marée, il n'est pas possible de mesurer les débits de la Charente au niveau de son embouchure dans le bassin de Marennes – Oléron, ni dans la partie aval du fleuve, soumise à l'influence de la marée.

Les mesures les plus en aval disponibles sont celles de la station de Saint-Savinien, au niveau du barrage. Néanmoins, ces données sont éparées du fait de la difficulté de la mesure à cet endroit (suivant les coefficients de marée, les manœuvres du barrage, etc.) : les chroniques sont donc largement incomplètes. De plus, les apports de la Boutonne (environ 15% du bassin) ne sont pas pris en compte car la confluence est à l'aval de Saint-Savinien.

Pour fiabiliser les données de la Charente aval, la station de Saint-Savinien a été remontée au pont de Beillant (commune de Chaniers) en 2004. Cette station est plus fiable, mais est récente et ne contrôle pas les apports de la Seugne.



La première hypothèse de calcul est de considérer que les apports à l'estuaire sont égaux au débit de Saint-savinien plus celui de la Boutonne à Carillon. Quand les débits à ces stations ne sont pas disponibles, ce qui est le cas la plupart du temps, on les reconstitue grâce aux débits des stations amont sur la base d'une relation de corrélation. Les méthodes de corrélation utilisées sont simples et basées sur la comparaison des débits mesurés entre plusieurs stations.

- ✓ Concernant les apports de la Boutonne, comme Carillon est fiabilisée depuis peu, on utilise les débits à la station de Moulin de Chatre, avec un coefficient multiplicateur traduisant l'augmentation de bassin versant.
- ✓ Pour la Charente, lorsque les débits à Saint-Savinien sont indisponibles, on utilise la somme des débits Pont de Beillant + Seugne (station de la Lijardière).
- ✓ Lorsque Beillant n'est pas disponible, on remonte à Jarnac, avec une corrélation entre Jarnac + Seugne et Saint-Savinien, ou bien une corrélation entre Jarnac et Saint-Savinien directement si les débits de la Seugne sont indisponibles.
- ✓ Enfin, si Jarnac est indisponible, on la reconstitue avec une somme pondérée de Vindelle sur la Charente et Foulpougne sur la Touvre. La pondération prend en compte les différences majeures entre les régimes de la Charente amont et la Touvre, qui est issue des résurgences du karst de La Rochefoucauld.

Des imprécisions sur l'estimation du débit à l'estuaire sont inhérentes à ce type de corrélations, mais ces reconstitutions permettent néanmoins de compléter les chroniques de débit mesurées et de pouvoir profiter du maximum de mesures qualitatives effectuées par l'IFREMER depuis 1977.

2.4. Quelques ordres de grandeur

Selon le modèle SIAM 3D, le bassin de Marennes Oléron est un système au renouvellement rapide, très sensible aux conditions de vent, avec un temps de renouvellement sans vent de 14 jours pour un volume d'environ 804 millions de m³.

A Rochefort, le débit oscillant est de 7 à 14 millions de mètres cubes en fonction du coefficient de marée. Les débits sont de 420 à 750 m³/s au jusant et de 300 à 800 m³/s au flot.

Etant plus proche de l'embouchure, le volume oscillant et les débits au jusant et au flot sont plus élevés à Fontenelles, mais les données de Rochefort donnent les ordres de grandeur.

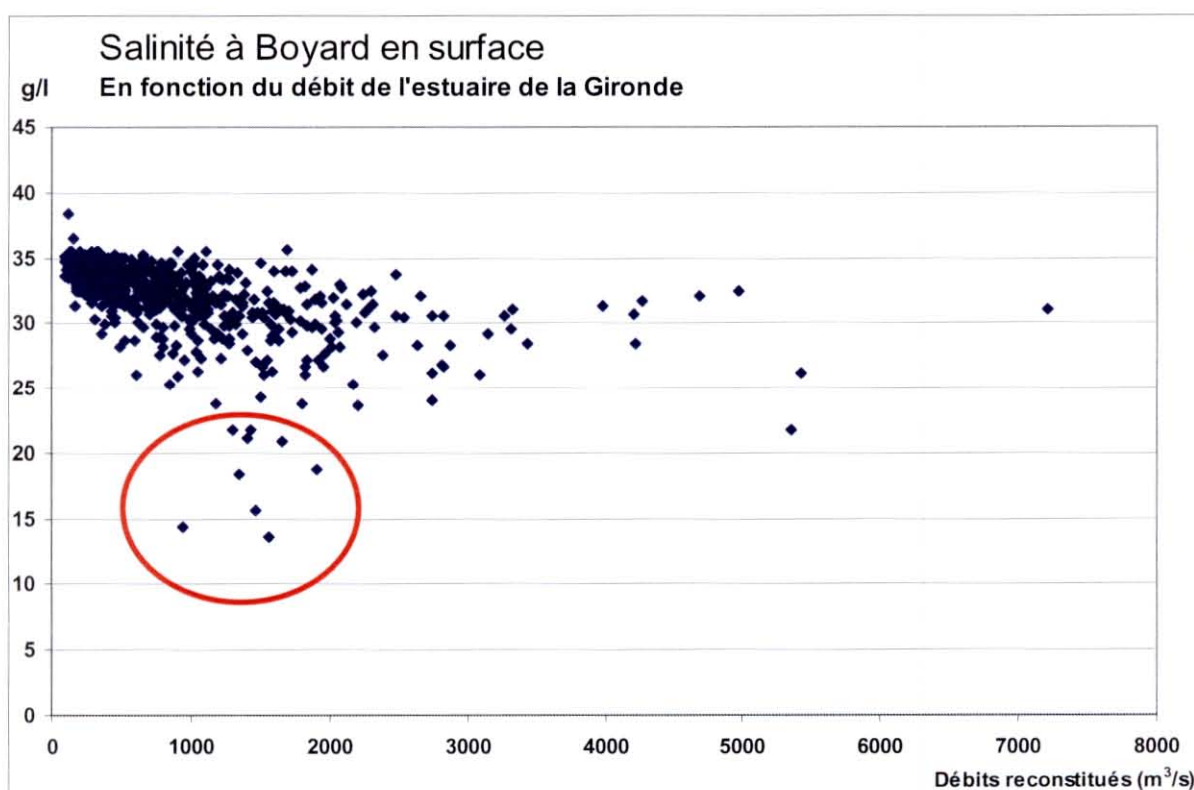
3. La salinité

3.1. La station de Boyard

Les travaux de l'IFREMER (modèle SIAM 3D ?) montrent que la salinité du bassin de Marennes Oléron est influencée par le panache de l'estuaire de la Gironde.

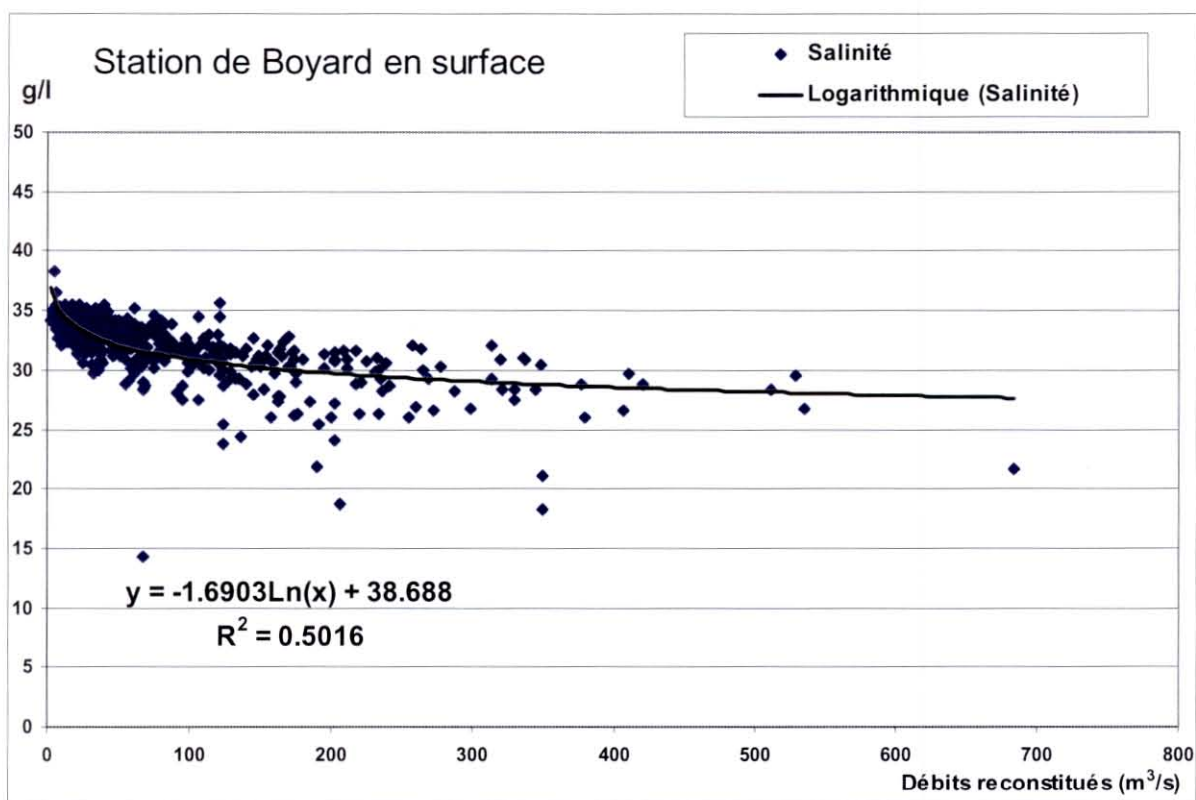
Le débit de l'estuaire a été reconstitué sur la base des stations suivantes, hors d'influence de la marée :

- ✓ La Garonne à Tonneins
- ✓ La Dordogne à Gardonne
- ✓ L'Isle à Abzac
- ✓ La Dronne à Coutras



La salinité à Boyard en surface montre une certaine sensibilité au débit de l'estuaire de la Gironde (Graphique ci dessus). La variabilité des résultats montre que d'autres paramètres, certainement plus locaux, influencent la salinité à Boyard, en particulier sur les faibles valeurs de salinité observées pour des débits de l'estuaire de la Gironde de l'ordre de 1000 à 2000 m³/s.

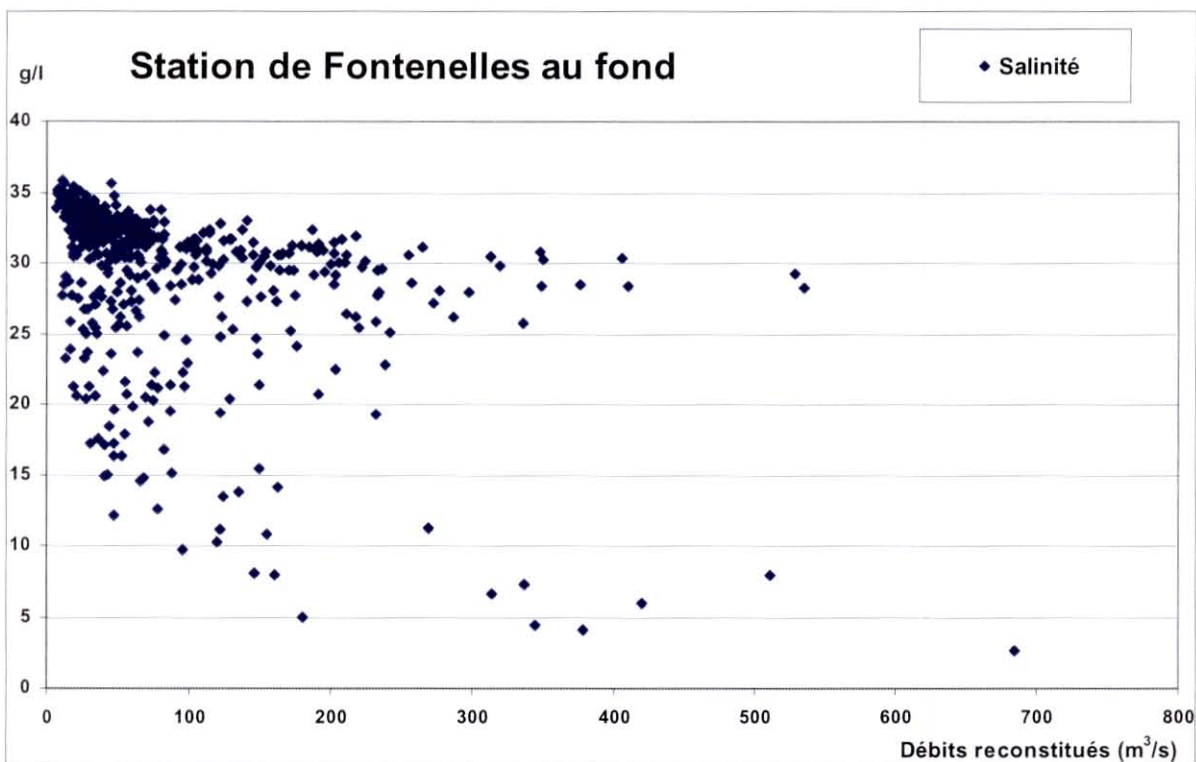
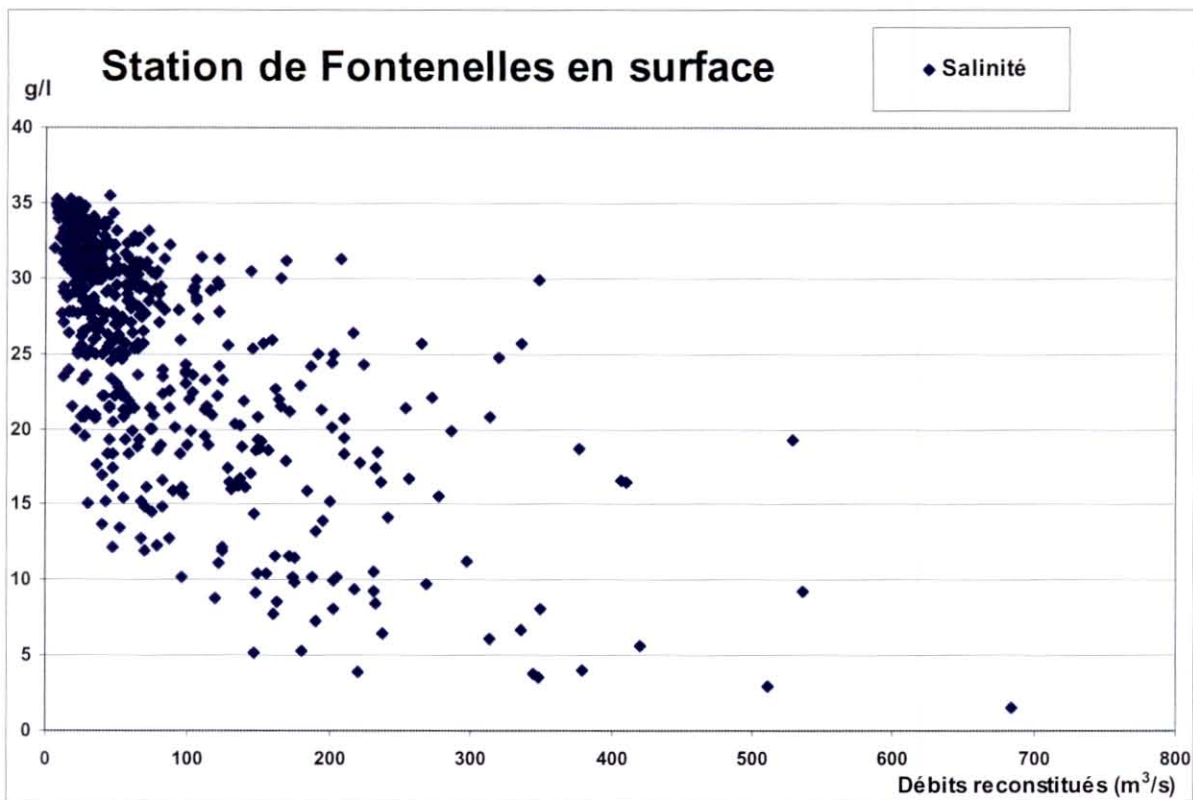
La salinité à Boyard en surface, bien que en dehors du panache de l'estuaire de la Charente montre une assez bonne corrélation avec le débit de la Charente (Graphique ci dessous). Cette corrélation est sans doute le reflet d'une situation climatique locale ayant un effet sur la salinité de surface à Boyard.



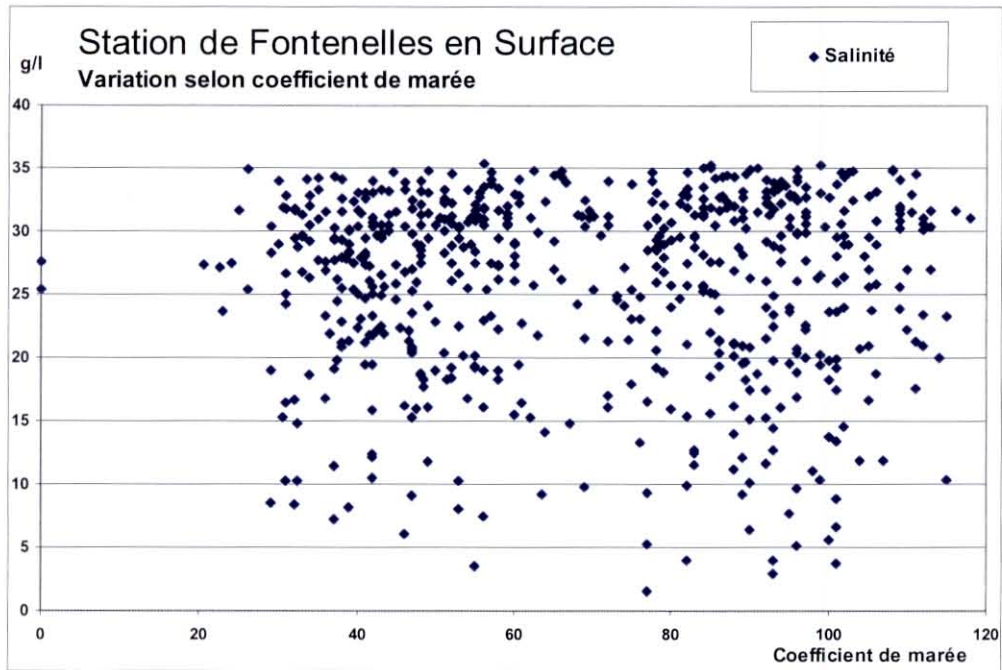
3.2. La station de Fontenelles

1.1.1. Evaluation de l'impact de différents paramètres

L'analyse de la salinité à Fontenelles en fonction du débit reconstitué de la Charente montre une tendance nette à la diminution de la salinité en fonction du débit, mais avec une forte variabilité aussi bien sur la mesure de surface que de fond (Graphiques ci-dessous).

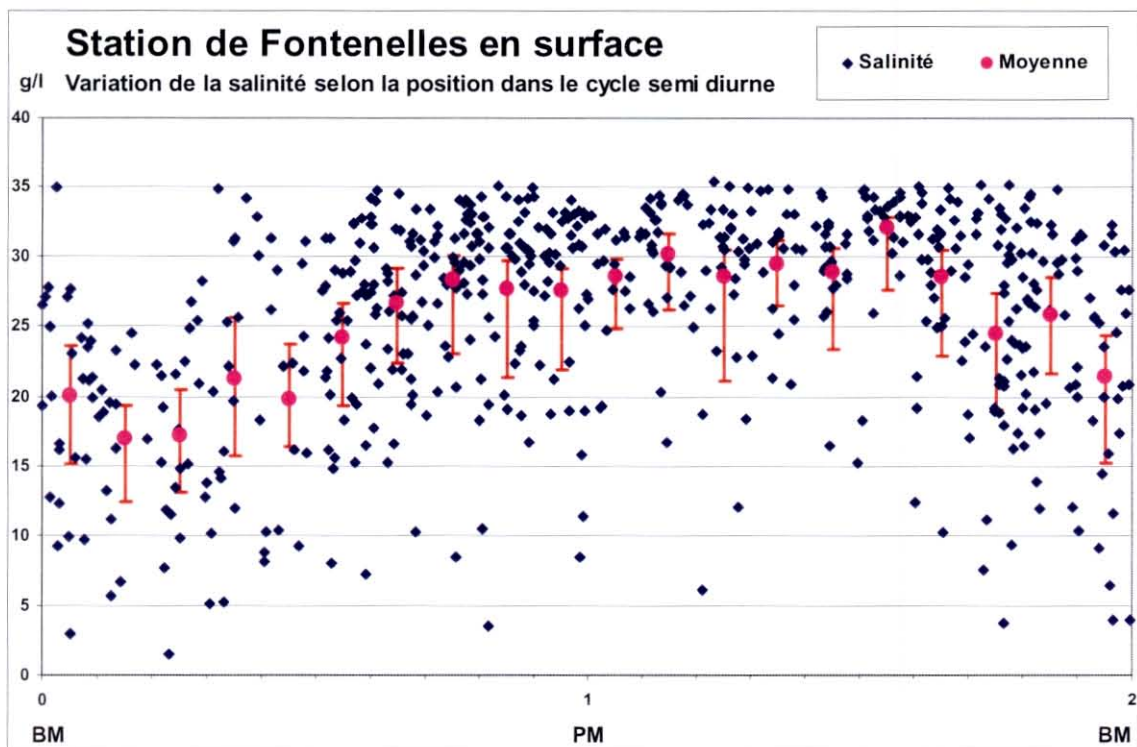


Le coefficient de marée ne semble pas expliquer cette variabilité. Le graphique suivant montre en effet l'absence de corrélation entre la salinité à Fontenelle en surface avec le coefficient de marée. Les résultats sont comparables sur les mesures de fond.



Etant à l'embouchure de l'estuaire, la salinité à Fontenelles est fortement dépendante de l'intrusion marine liée notamment à la position de la mesure par rapport au cycle semi diurne de la marée.

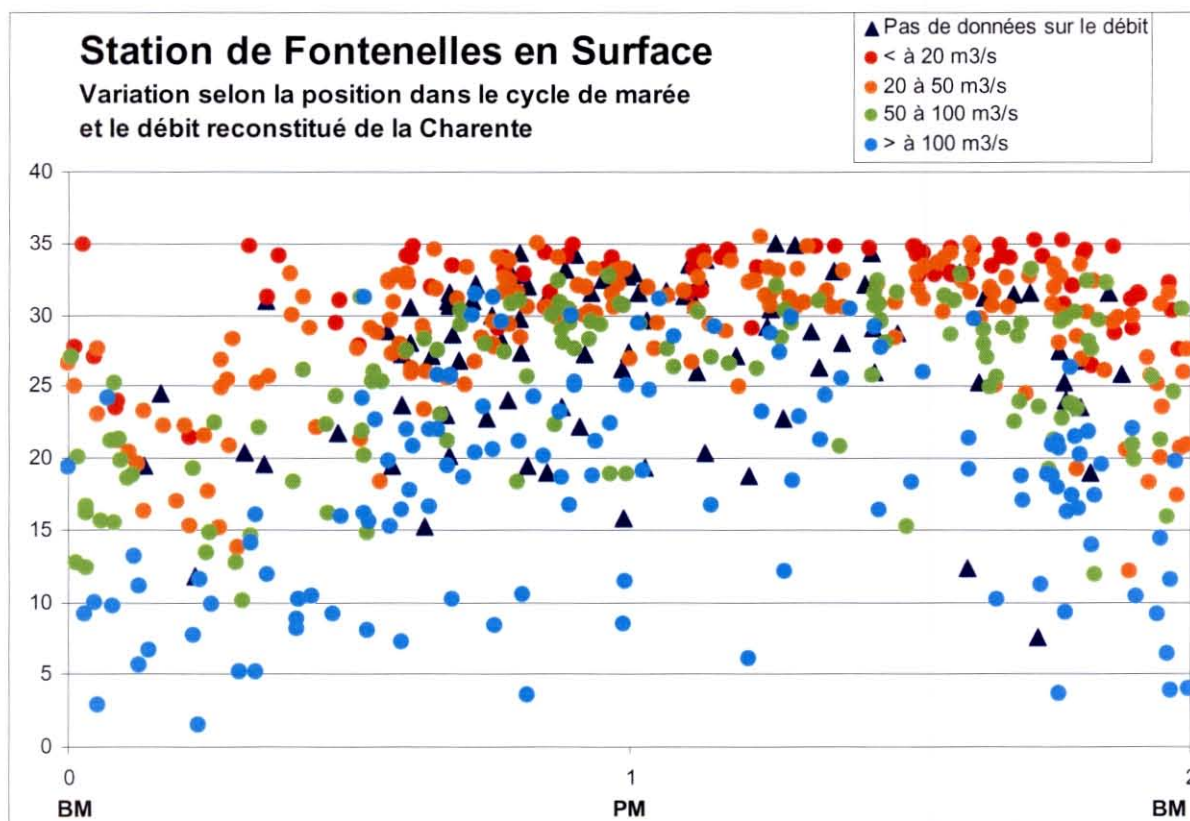
Le graphique suivant présente la distribution des mesures de salinité à Fontenelles en surface en fonction du cycle de marée. Les mesures ont été classées sur une échelle allant de 0 (basse mer) à 1 (pleine mer) pour le flot et de 1 (basse mer) à 2 (pleine mer) pour le jusant.



Moyennes et écarts type des mesures selon leur position dans le cycle de marée

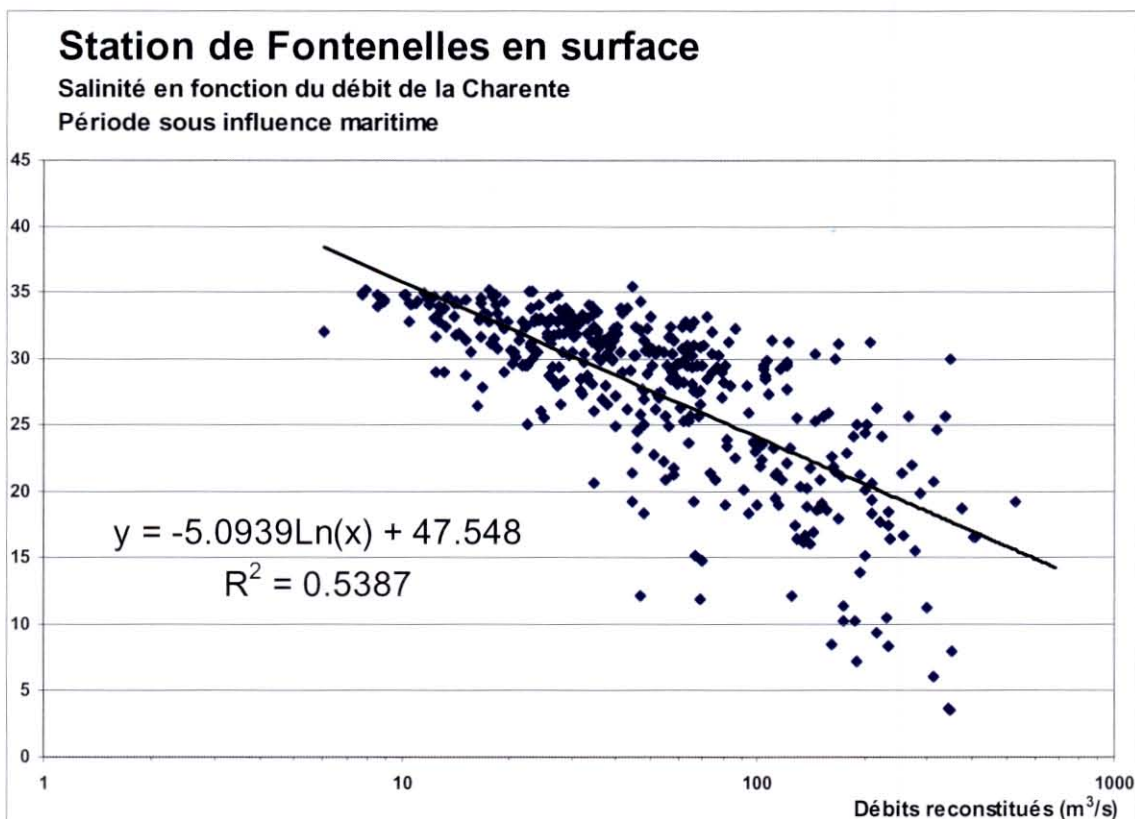
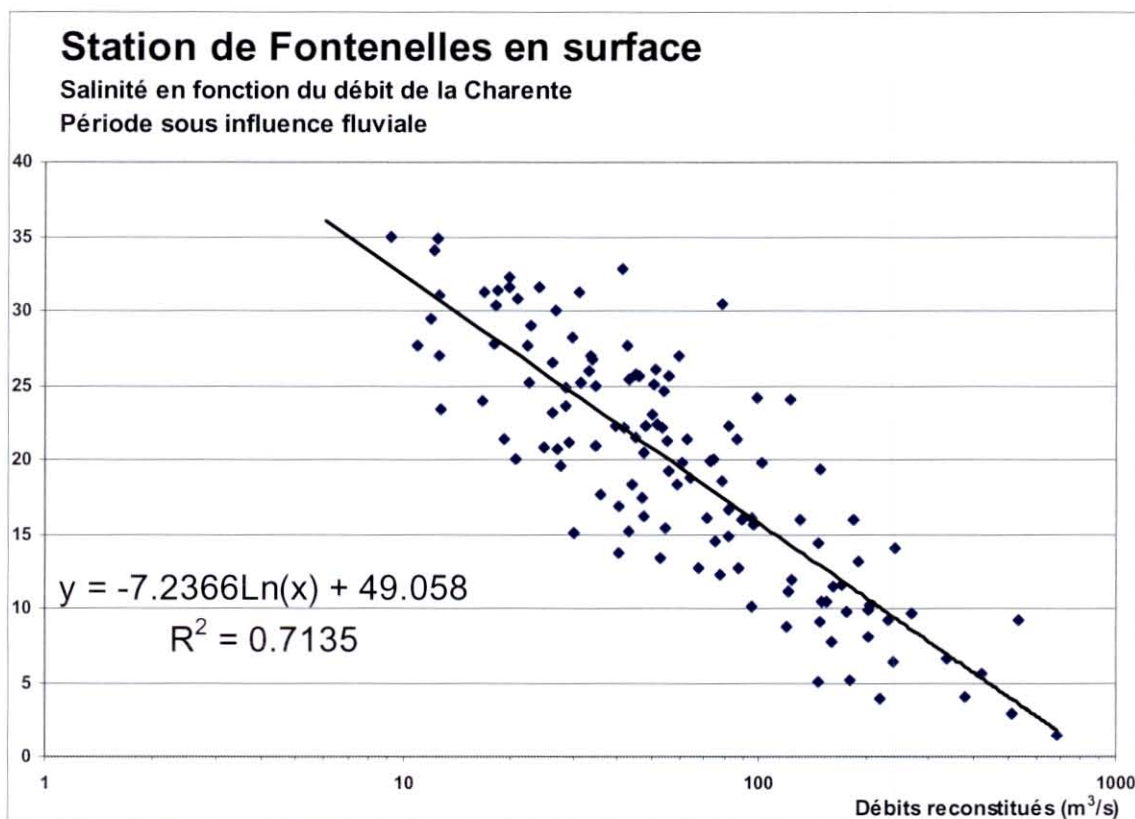
Position dans cycle	Moyenne	ecartype sup	ecartype inf
0.1	19.94	3.64	4.84
0.2	16.86	2.45	4.45
0.3	17.15	3.21	4.06
0.4	21.15	4.38	5.45
0.5	19.73	3.91	3.34
0.6	24.07	2.57	4.83
0.7	26.65	2.46	4.28
0.8	28.29	1.71	5.35
0.9	27.60	1.99	6.35
1	27.53	1.59	5.66
1.1	28.56	1.18	3.74
1.2	30.05	1.45	3.88
1.3	28.45	1.92	7.41
1.4	29.42	1.71	2.95
1.5	28.82	1.74	5.49
1.6	31.94	0.80	4.35
1.7	28.54	1.91	5.64
1.8	24.42	2.98	5.42
1.9	25.85	2.71	4.17
2	21.41	2.93	6.22

Les résultats font apparaître de forte valeurs de salinité (moyenne > 25 g/l) sur la deuxième moitié du flot et la quasi-totalité du jusant. Sur cette période, il semble que la mesure de la salinité soit principalement sous l'influence de l'intrusion marine ce qui peut conduire à masquer l'influence des apports du fleuve (Graphique ci-dessous).



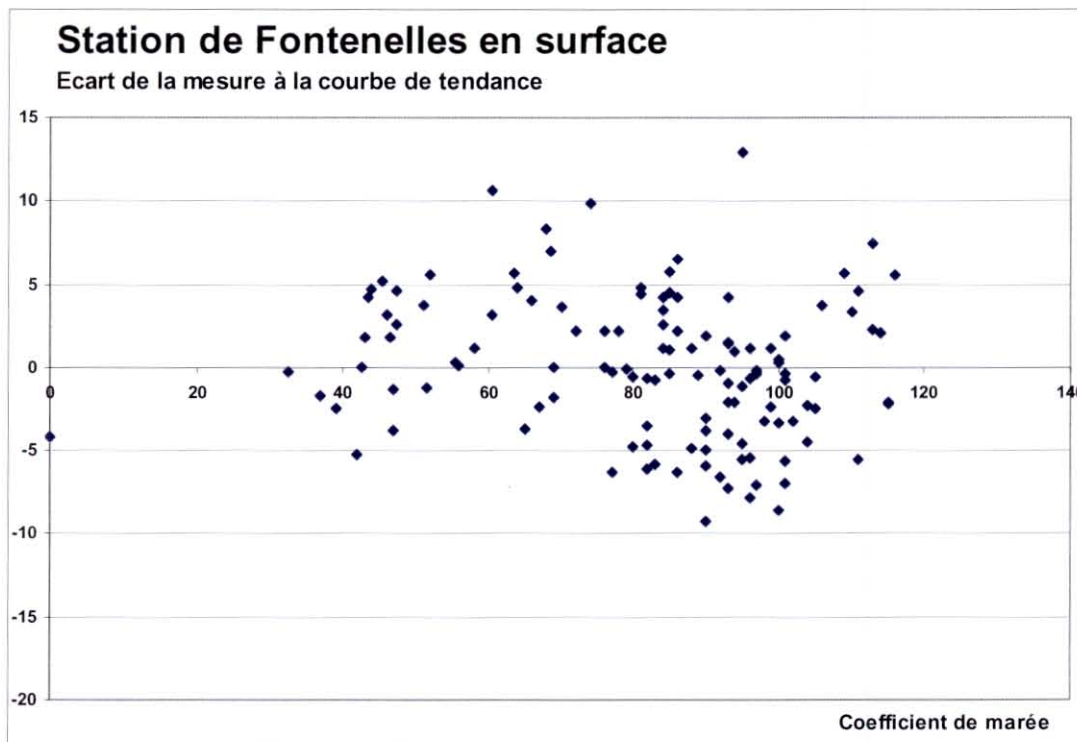
La première période du flot (indice compris entre 0 et 0.5) et la fin du jusant (indice > 1.9) a été retenue comme « période sous influence fluviale », le reste du cycle étant considéré comme « période sous influence maritime ».

L'analyse de la salinité en fonction du débit de la Charente sur ces périodes respectives est reportée dans les graphiques suivants.

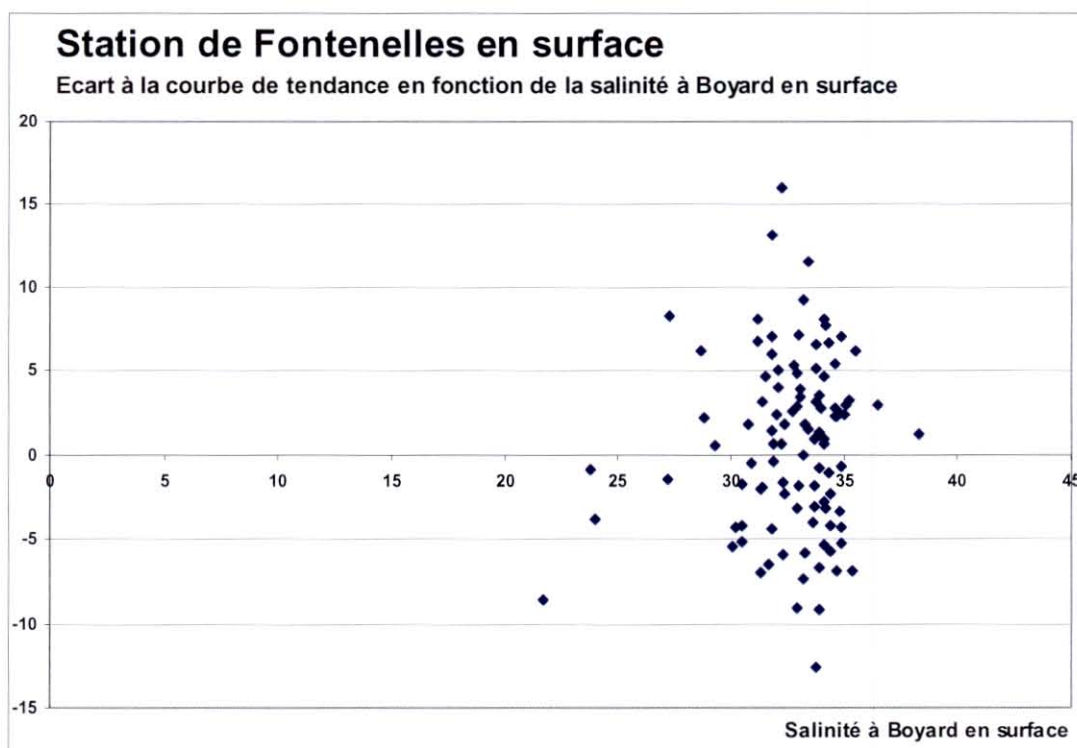


La meilleure corrélation est obtenue avec les mesures réalisées durant la « période sous influence fluviale » selon une relation logarithmique.

Au vu de l'influence de la marée sur la salinité à Fontenelle en surface, la différence entre la mesure et la courbe de tendance a été croisée avec le coefficient de marée. Les résultats ne font pas apparaître de lien direct entre le coefficient de marée et l'écart à la mesure.



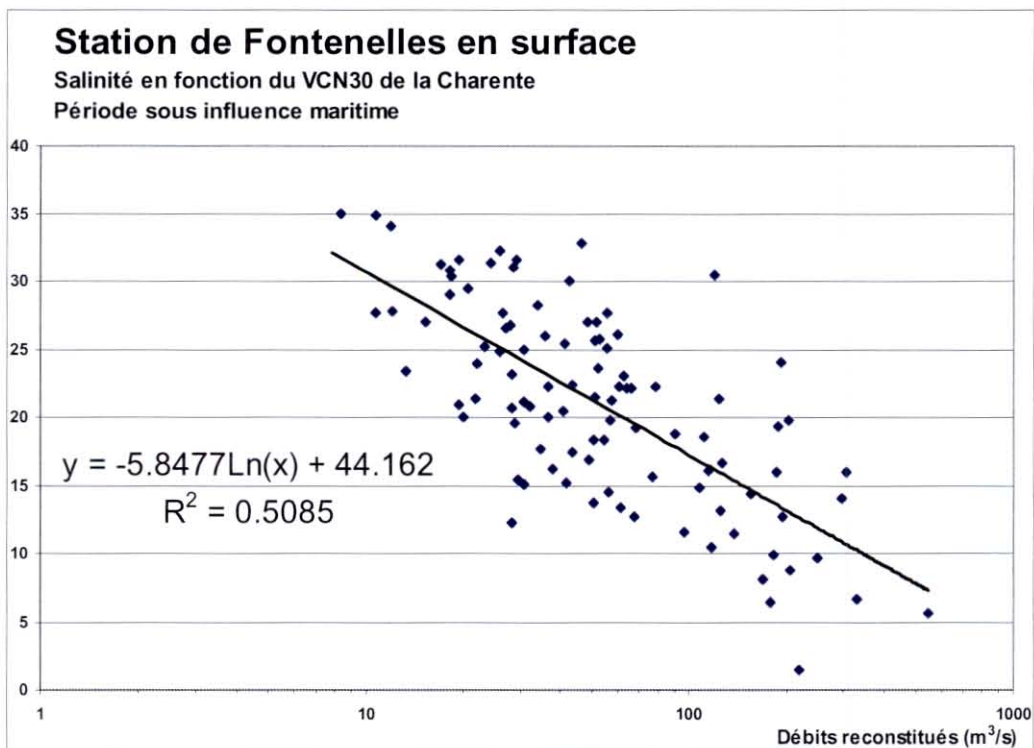
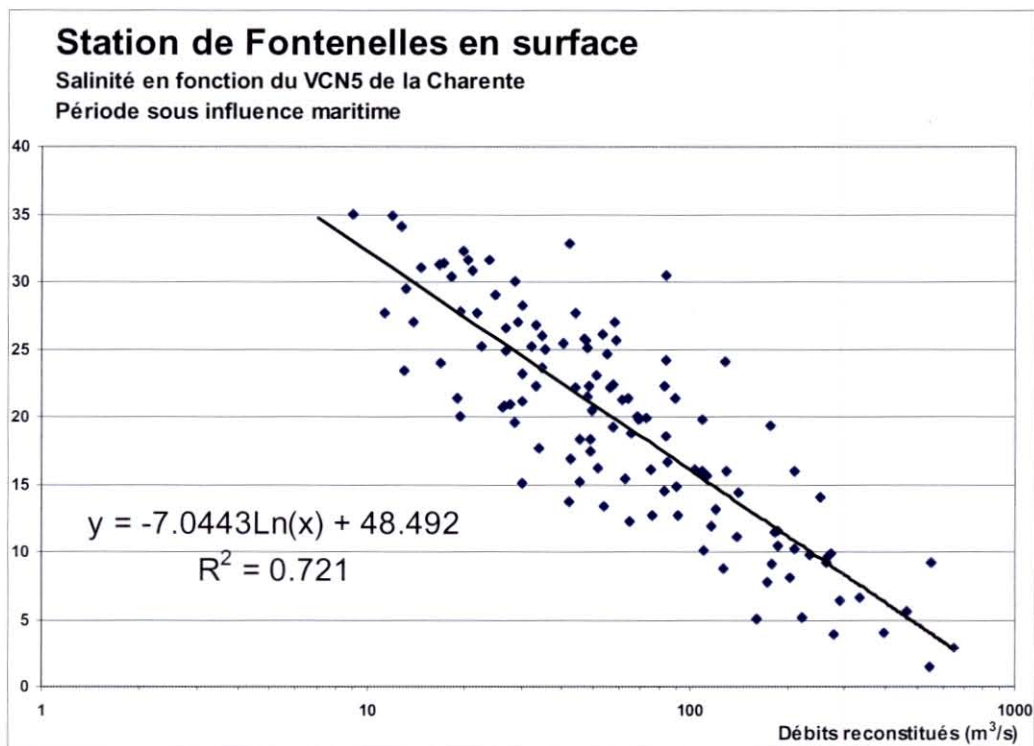
De même, la salinité du bassin de Marennes (référence salinité de surface à Boyard) entrant dans l'estuaire pourrait être à l'origine de l'écart à la mesure. Le graphique suivant montre l'absence de relation directe avec ce paramètre.



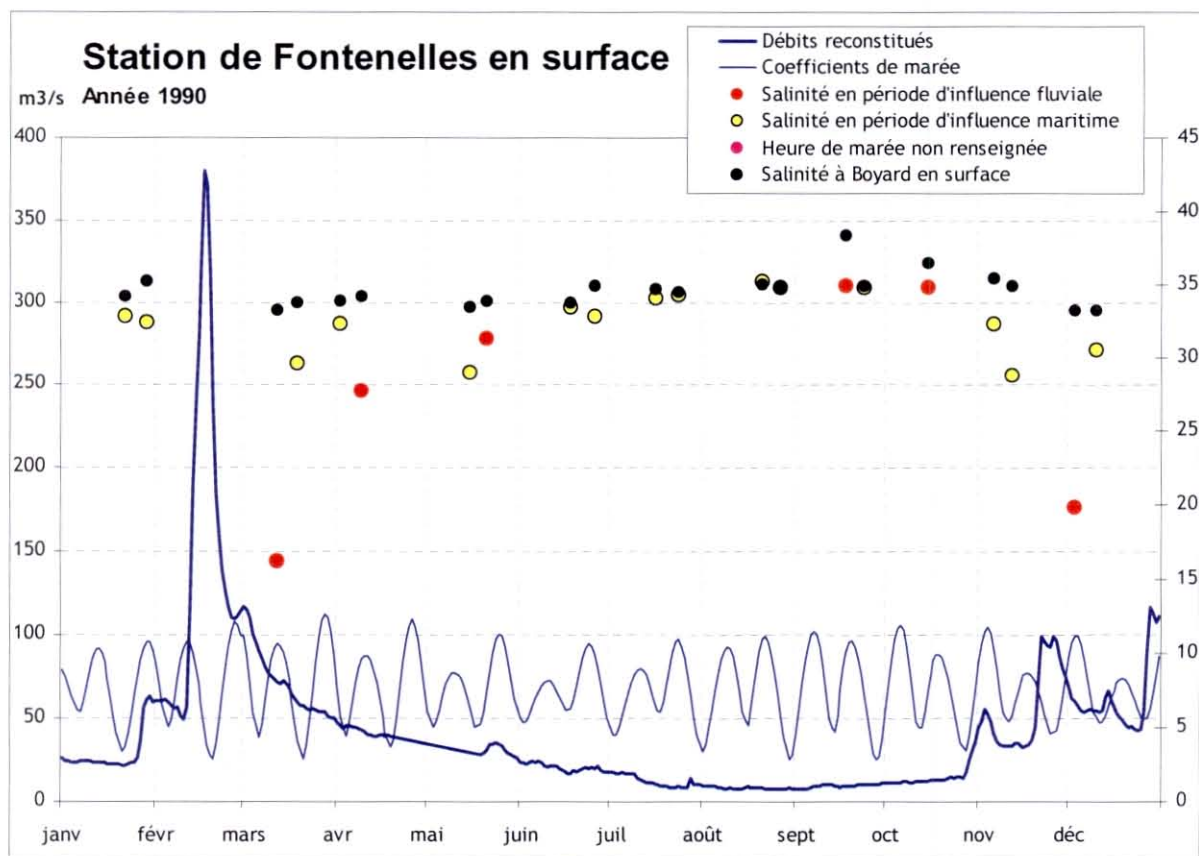
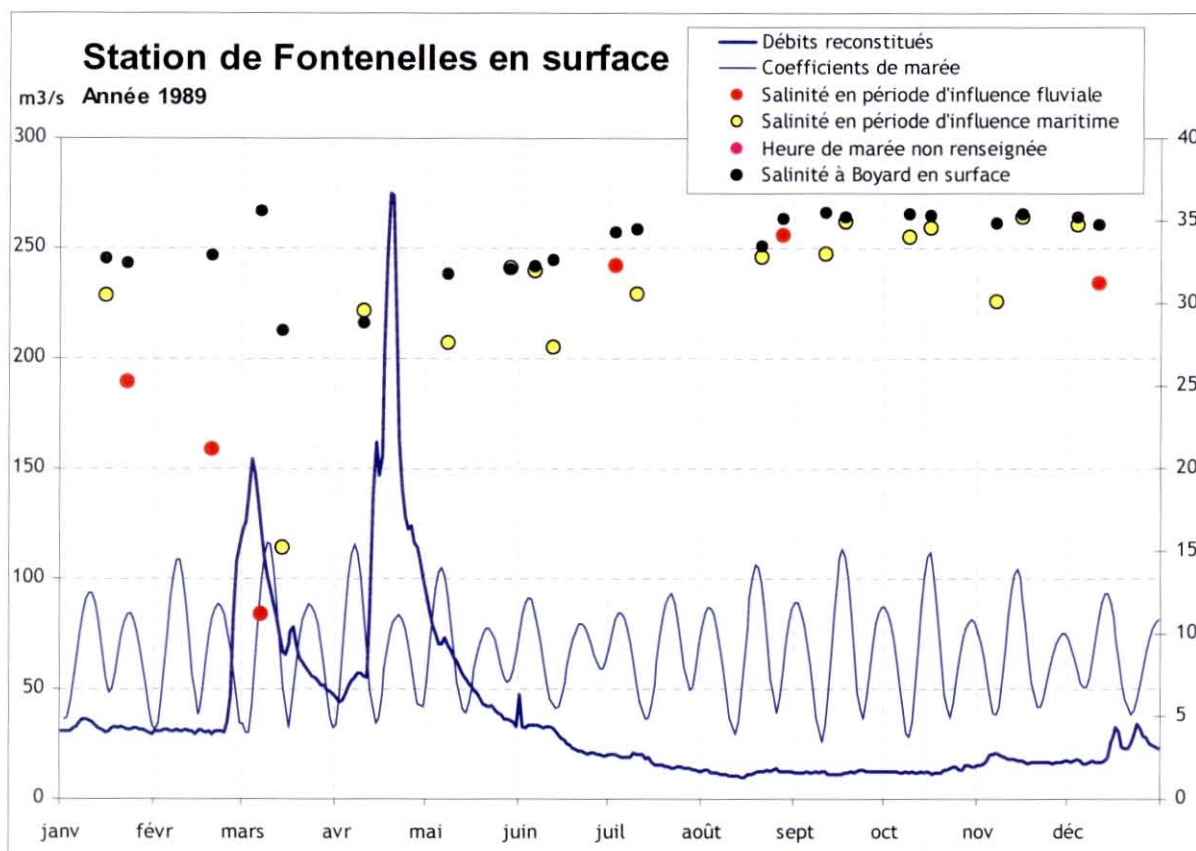
L'écart à la mesure pourrait provenir d'un effet cumulatif du débit fluvial sur la salinité. En effet, on peut supposer que la salinité de l'estuaire soit dépendante de l'hydrologie récente du fleuve, ce que ne pourrait transcrire le débit journalier.

La corrélation a été testée sur le VCN5, le VCN10 et le VCN30 (graphiques ci-dessous).

Le résultat est légèrement meilleur avec le VCN5, avec un coefficient de corrélation de 0.72 contre 0.71 avec les débits journaliers. Il passe à 0.70 avec le VCN10 et tombe à 0.5 avec le VCN30.



L'effet cumulatif du débit du fleuve sur la salinité semble donc limité. Ce résultat se confirme lorsque l'on replace la mesure dans le cycle hydrologique annuel (graphiques ci-dessous).



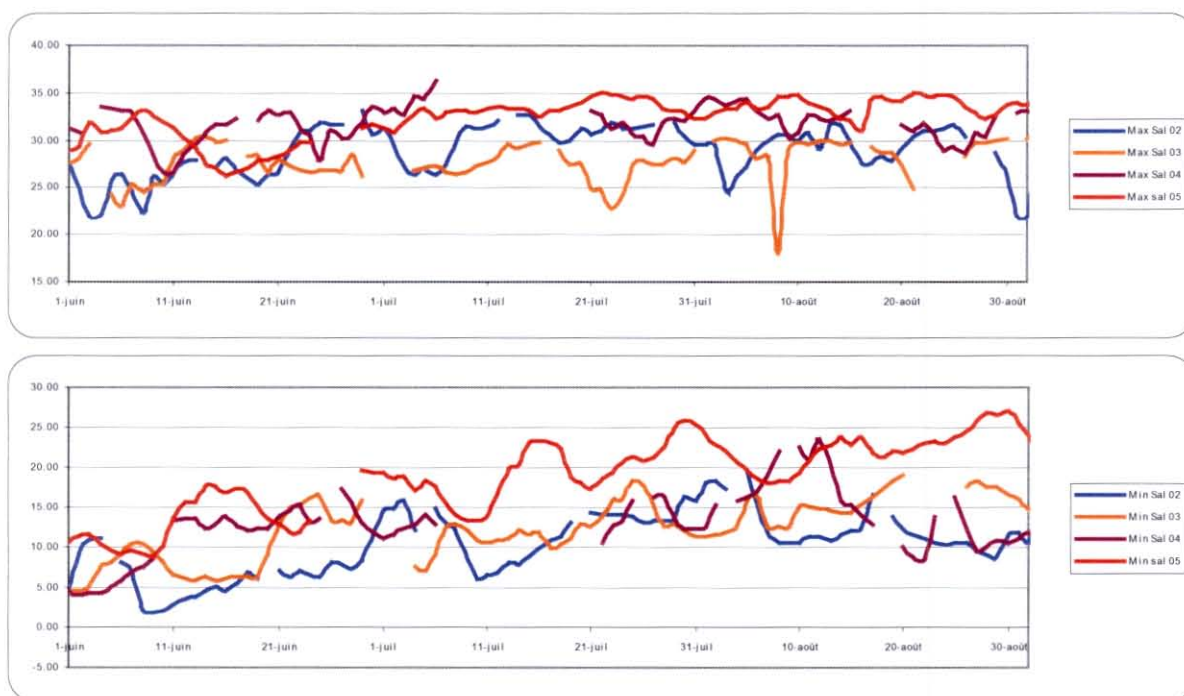
L'étiage de 1989 a été très sévère sur la Charente, avec des mesures de salinité toujours supérieures à 30 g/l quelle que soit la position de la mesure dans le cycle de marée.

En 1990, suite à la crue du 17 février (350 m³/s), la salinité mesurée le 11 mars était d'environ 15 g/l. La sévérité de l'étiage de l'année précédente semble donc avoir été « effacée » sur un seul épisode de crue. De même, à la fin de l'année 1990 dès la sortie d'étiage, une mesure de salinité de 20 g/l est observée pour des débits de 50 à 100 m³/s.

Selon le rapport *Calamités agricoles 2005 : influence de la qualité de l'environnement sur le captage des huîtres 2005 dans les pertuis Charentais de ??*, « le déficit de captage d'huîtres dans les pertuis charentais en 2005 est important, et peut s'évaluer à 70 - 80 % sur l'ensemble de la zone. Ce déficit est imputable à des conditions environnementales particulières de salinité élevée, température basse, et pauvreté du milieu en substances nutritives pour les bivalves (mesures réseaux IFREMER). »

Selon ce rapport, « si la température est un aléa climatique en soi, la salinité élevée et le déficit de nourriture sont à corrélérer directement avec les apports continentaux en eau douce. Les **déficits cumulés** de pluviométrie ces trois dernières années sont mis en cause dans la faiblesse de captage d'huîtres en 2005. »

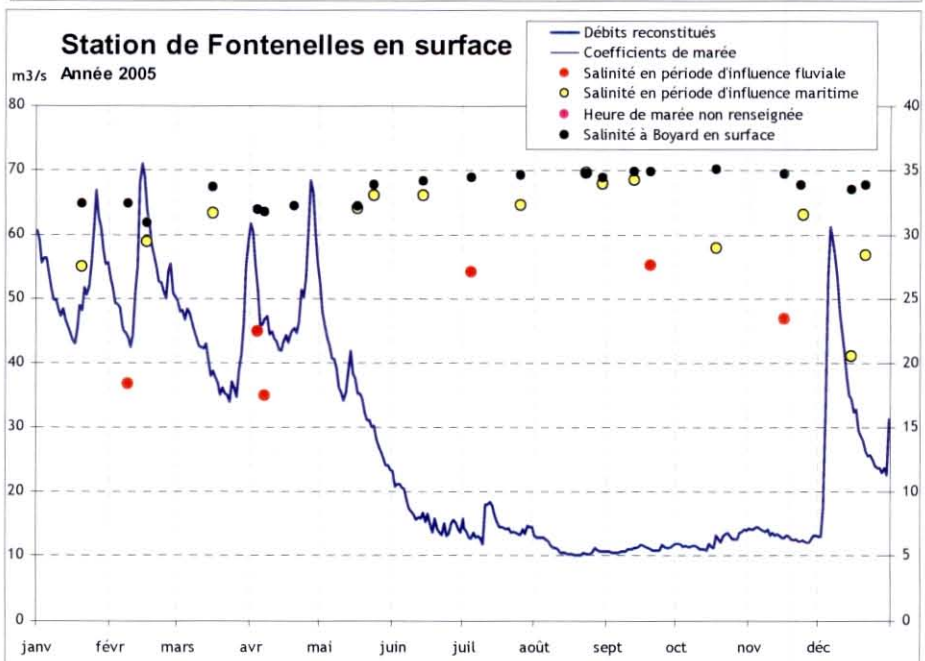
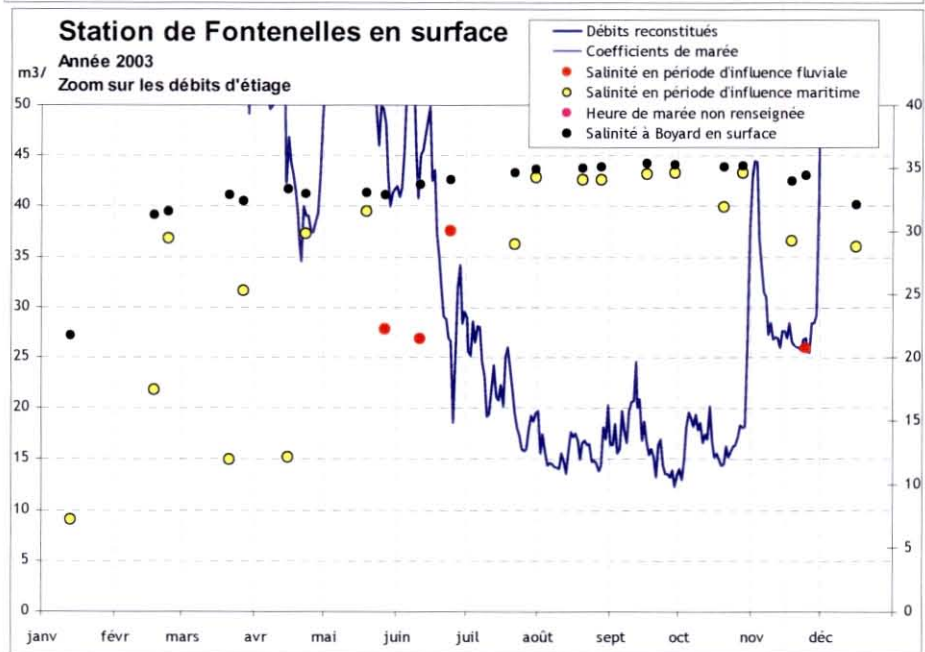
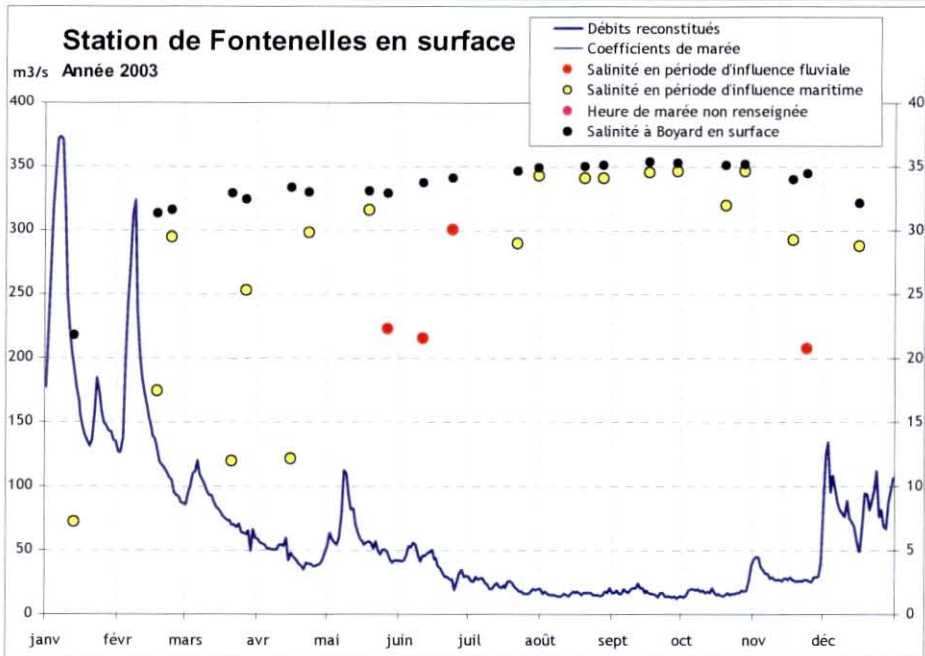
Le rapport se base sur le suivi en continu de la salinité à l'embouchure de l'estuaire de la Charente (Fort Lupin, étés 2002, 2003, 2004, 2005).



Salinité en embouchure de Charente : maximum et minimum journaliers de 2002 à 2005

Selon le rapport « En 2005, à l'embouchure de la Charente (Fort Lupin), les salinités minimales journalières (correspondant approximativement à l'heure de basse mer) sont supérieures à celles des années antérieures, y compris 2003, année sèche et chaude. Les maxima journaliers obtenus dans l'estuaire sont des valeurs franchement marines (34 ppm). **Les déficits pluviométriques cumulés des trois dernières années entraînent une "marinisation" de l'estuaire.** »

La reconstitution des débits de la Charente réalisés par notre étude permet de replacer les étiages 2003 et 2005 dans le contexte hydrologique de ces deux années (graphiques ci après).



L'année 2003 présente des débits hivernaux relativement élevés, avec des épisodes de crue de 300 à 350 m³/s. Les débits hivernaux 2005 sont beaucoup plus faibles de l'ordre de 40 à 70 m³/s, sans épisode de crue important. Par ailleurs les débits d'étiage 2005 sont centrés autour de 10 m³/s, alors que ceux de 2003 sont légèrement plus élevés, de l'ordre de 15 à 20 m³/s.

Ces constats semblent confirmer nos résultats, à savoir l'absence d'effet cumulatif interannuel mesuré par l'Ifremer et une forte sensibilité de la salinité au débit journalier (ou au VCN5) de l'estuaire de la Charente.

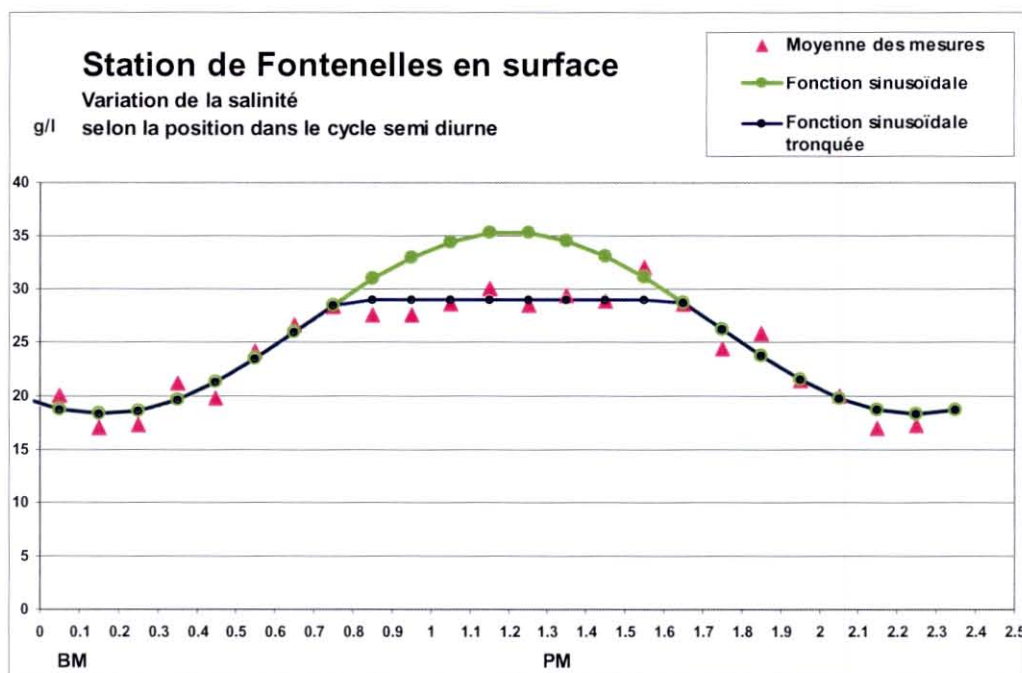
Ce point confirme l'importance d'une maîtrise du régime d'étiage sur le bassin de la charente, y compris sur de courtes périodes.

1.1.2. Modélisation de la salinité en fonction du débit de l'estuaire et de la position dans le cycle de marée

Finalement, deux facteurs semblent pouvoir expliquer l'écart entre la valeur mesurée et calculée :

- ✓ La précision de la reconstitution des débits ;
- ✓ La précision de la prise en compte de la position de la mesure dans le cycle de marée.

Afin de clarifier ce dernier facteur, l'équation caractérisant la moyenne des mesures de salinité en fonction de la position dans le cycle de marée a été étudiée.



La moyenne des mesures de salinité en fonction de la position dans le cycle de marée suit une fonction sinusoïdale tronquée. La valeur des paramètres de l'équation a été optimisée en utilisant l'outil Solveur d'Excel. On obtient les résultats suivants :

- X : la position de la mesure dans le cycle de marée (compris entre 0 et 2)
- Une sinusoïde : $\text{salinité moyenne} = 26.8 + 8,57 * \sin(3 * X + 4,23)$
- Une valeur maximale de 29 sur la moyenne

Le coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et calculées est de 0,91.

La relation obtenue précédemment entre le débit de la Charente et la salinité a été retravaillée en se basant sur les résultats obtenus sur l'influence de la position dans le cycle de marée :

- X : la position de la mesure dans le cycle de marée (compris entre 0 et 2)
- Y : débit de la Charente (test sur le débit journalier puis sur le VCN5)
- Salinité mesurée = $A \cdot \log(Y) + B + 26.8 + 8,57 \cdot \sin(3 \cdot X + 4,23)$

L'outil Solveur d'Excel a de nouveau été mobilisé pour optimiser cette équation :

	Toutes heures de marée		Période influence fluviale	
	Débit journalier	VCN5	Débit journalier	VCN5
Coeff. Log	-6.12	-6.06	-7.13	-6.93
Constante	24.73	24.60	28.92	28.33
Corrélation	0.7	0.7	0.74	0.75
Ancienne corrélation	0.5	0.51	0.71	0.72

La prise en compte de la position dans le cycle de marée permet une nette amélioration de la corrélation lorsque toutes les mesures sont prises en compte quelle que soit l'heure de marée.

L'amélioration de la corrélation est notable, mais moins importante lorsque seules les mesures réalisées durant la « période sous influence fluviale » sont prises en compte. En effet, à cette période l'influence marine est limitée et la moyenne des mesures est relativement stable.

On obtient donc la relation suivante entre la salinité, le débit journalier de la Charente et la position dans le cycle de marée, avec un coefficient de corrélation de 0.70 :

$$\text{Salinité mesurée} = -6.12 \cdot \log(Y) + 51.53 + 26.8 + 8,57 \cdot \sin(3 \cdot X + 4,23)$$

Notons que cette équation a été construite sur la base de mesures ponctuelles (1 à 2 mesures par mois depuis 1977). Une relation plus précise pourrait sans doute être obtenue en travaillant avec les données de mesure en continue de la salinité à Fontenelle, non mobilisés dans cette étude.

1.1.3. Les exigences de salinité pour l'ostréiculture

L'équation obtenue précédemment permet de déduire la salinité théorique à Fontenelles en Surface que l'on observerait sur un cycle de marée en fonction du débit. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Débit de la Charente	7.8	12	17.1	22.3	26.3
Position dans cycle marée	Salinité				
0	31.33	28.67	26.51	24.88	23.88
0.1	30.50	27.84	25.68	24.05	23.05
0.2	30.42	27.76	25.61	23.98	22.98
0.3	31.11	28.45	26.30	24.67	23.67
0.4	32.50	29.84	27.69	26.06	25.06
0.5	34.47	31.81	29.65	28.02	27.02
0.6	35.00	34.18	32.02	30.39	29.39
0.7	35.00	35.00	34.58	32.94	31.94
0.8	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
0.9	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.1	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.2	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.3	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.4	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.5	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.6	35.00	35.00	35.00	34.77	33.77
1.7	35.00	35.00	34.82	33.19	32.19
1.8	35.00	34.42	32.26	30.63	29.63
1.9	34.68	32.02	29.87	28.24	27.24
Salinité moyenne sur un cycle	34	33	32	31	30.0

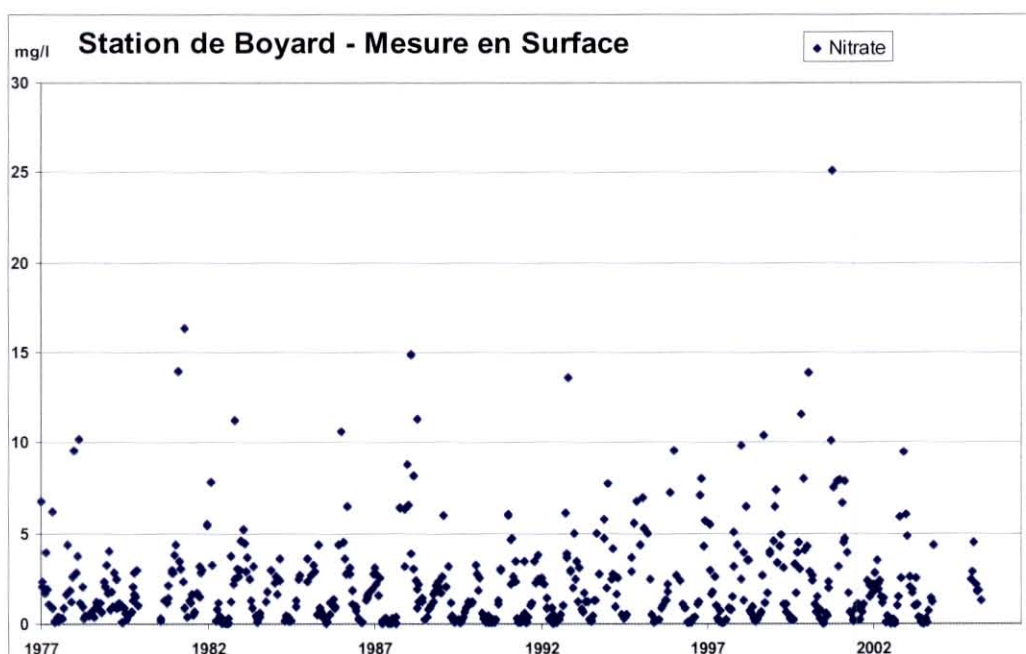
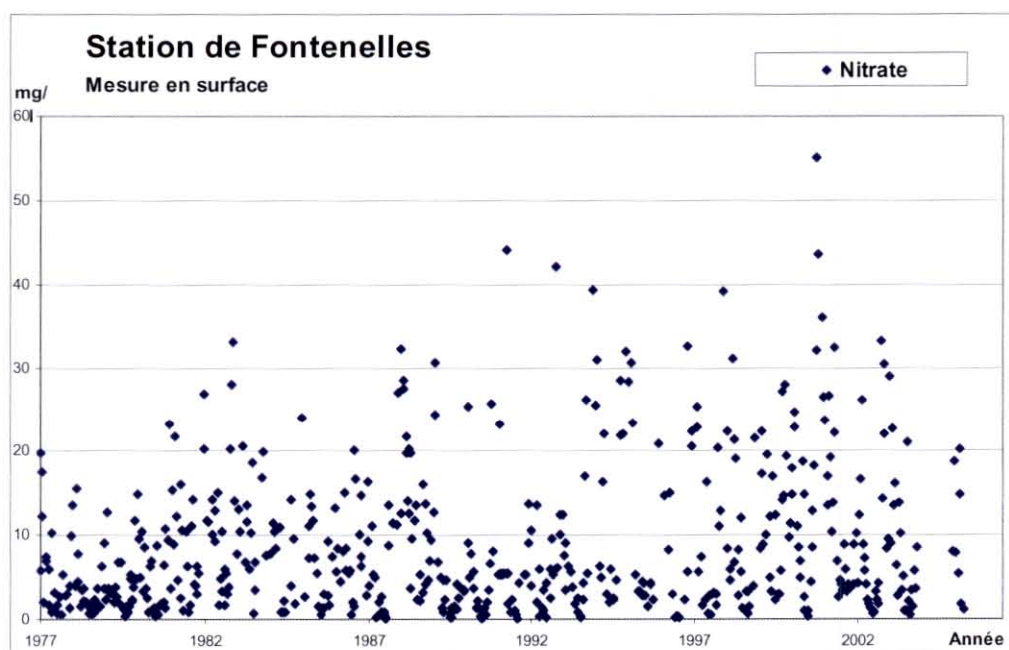
Une salinité moyenne théorique de 32 g/l serait donc obtenue pour un débit de la Charente de 17,1 m³/s. Un débit de 12 m³/s (DOE) ferait passer la salinité moyenne à 33 g/l.

4. Les nitrates

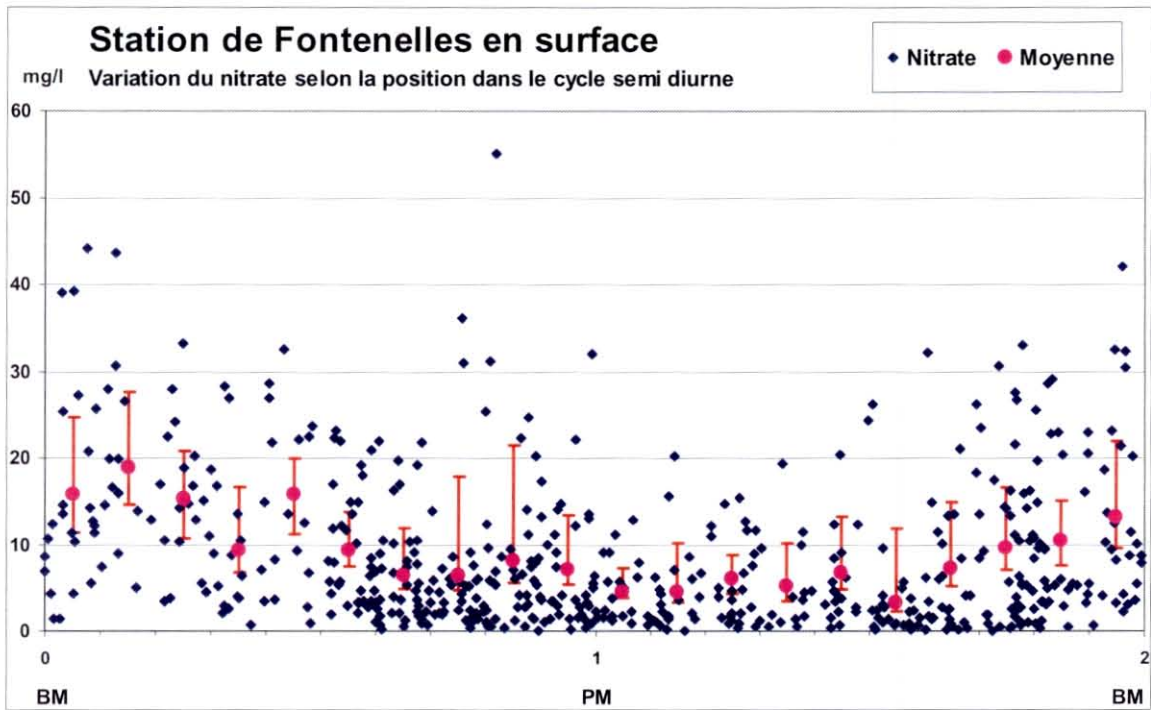
1.1.4. Evaluation de l'impact de différents paramètres

La concentration en nitrate en Fontenelles peut varier selon différents facteurs :

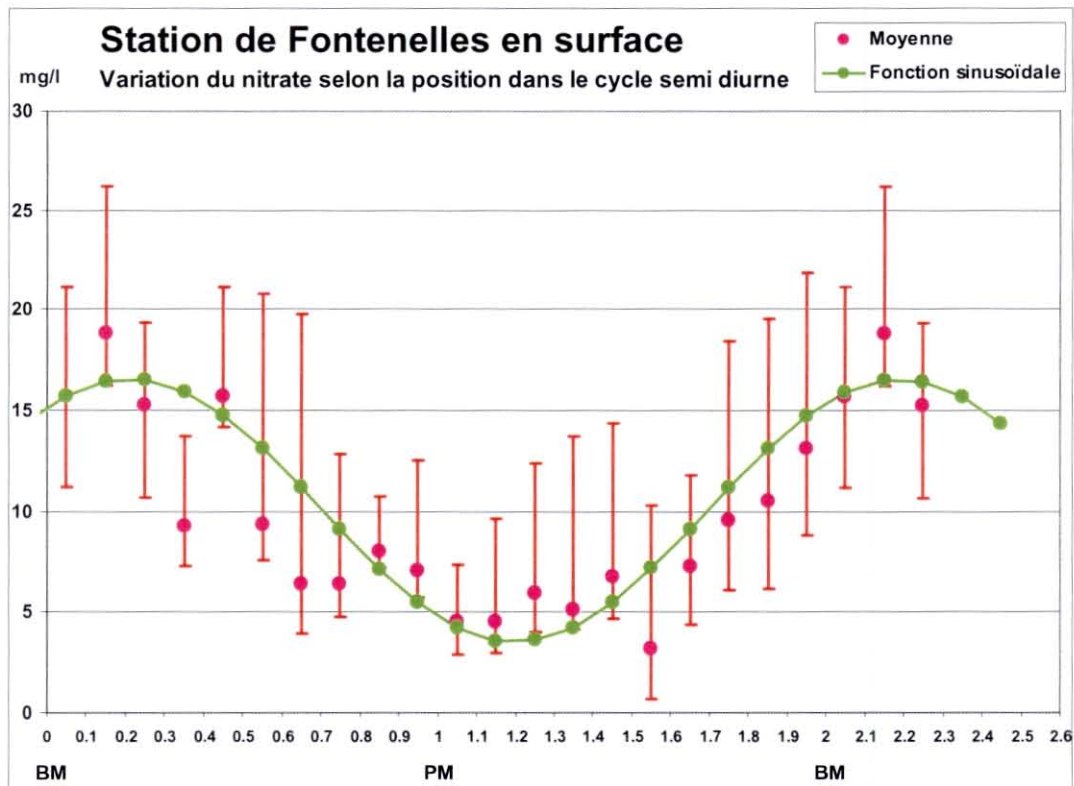
- ✓ La position de la mesure dans le cycle de marée (facteur de dilution marine, en supposant que les apports de l'intrusion marine sont faibles) ;
- ✓ Le débit, reflet du lessivage du nitrate dans le bassin versant (facteur inverse de la dilution fluviale) ;
- ✓ L'année de mesure, reflet de l'intensification de la fumure azotée, comme le suggère le graphique ci-dessous ;
- ✓ La saison : le surplus d'azote dans les sols, peu lessivé pendant l'été, peut conduire à des pics d'azote lors de la première crue automnale.



La position de la mesure dans le cycle de marée influence fortement la concentration en nitrate à Fontenelle selon un profil symétrique à la salinité. En effet, les apports en nitrate proviennent principalement du fleuve alors que le sel est d'origine marine.



La relation entre la moyenne des mesures et la position dans le cycle de marée a été étudiée afin de désinfluencer les mesures de l'heure de marée (Graphique suivant).

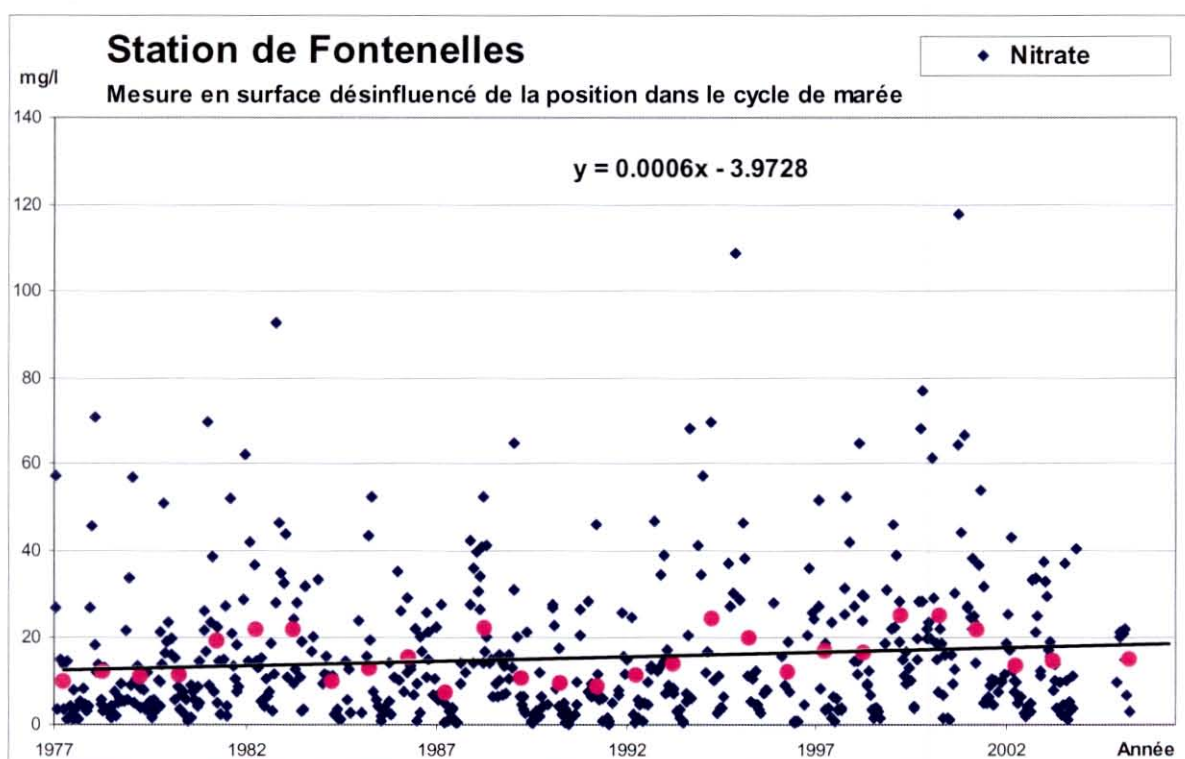


L'équation de la fonction sinusoïdale obtenue est :

- ✓ X : la position de la mesure dans le cycle de marée
- ✓ Moyenne de la concentration en nitrate = $10 + 6.5 \cdot \sin(3.17X + 0.9)$
- ✓ Coefficient de corrélation : 0.72

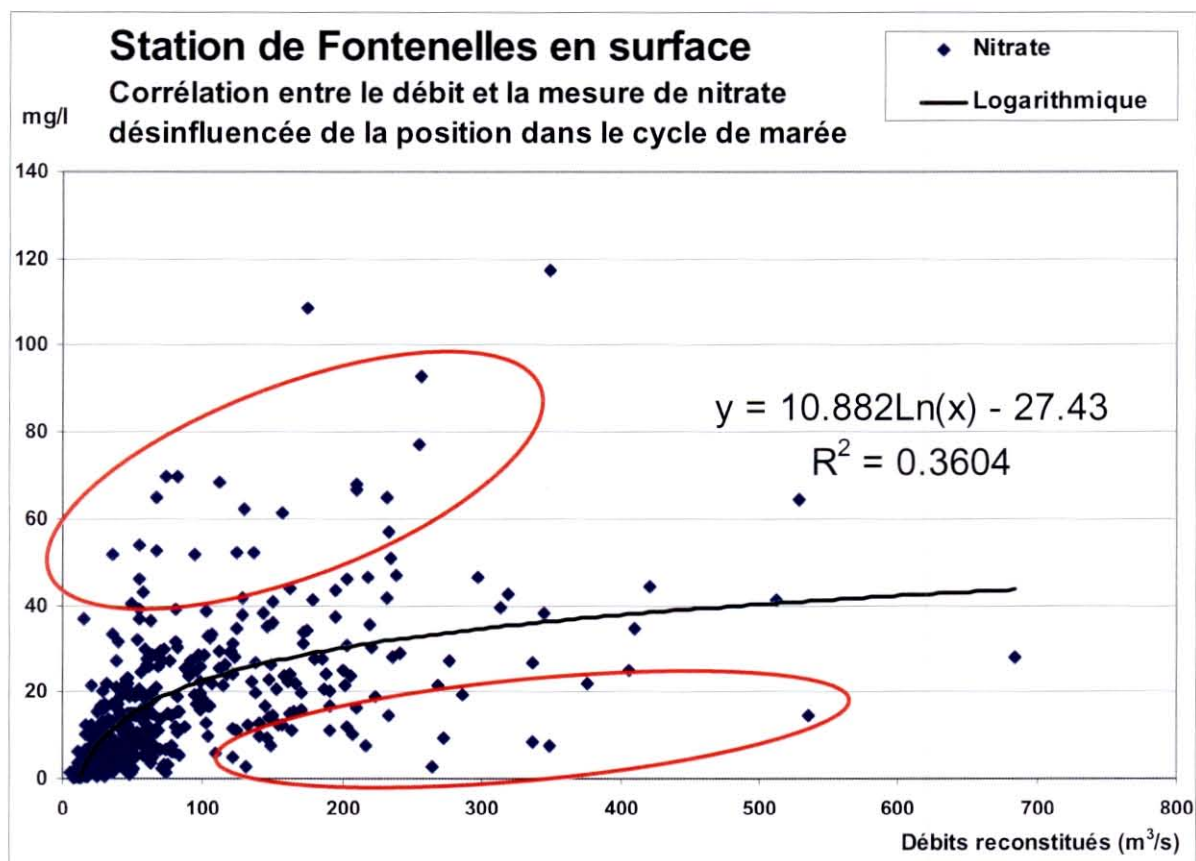
Afin de désinfluencer la mesure de la position dans le cycle de marée, on a posé comme hypothèse que l'équation obtenue représentait la dilution dans l'estuaire en fonction de la marée. L'ensemble des mesures de nitrate a donc été rapporté à une même heure de marée, selon le ratio :

- Concentration moyenne heure de référence / concentration moyenne à heure de mesure
- Heure de référence : $X = 0.2$, soit le minimum de dilution



La chronique de mesures désinfluencées de l'heure de la marée fait apparaître une tendance à l'augmentation des concentrations en nitrate. Le coefficient de la courbe de tendance est de 0.219 mg NO₃ par an, avec une valeur initiale en 1977 de 12.2 mg/l. Entre 1977 et 2006, on observe une augmentation moyenne de la concentration en nitrate de 6.4 mg/l, soit une augmentation d'environ 52% sur la période.

La concentration en nitrate est corrélée positivement au débit de la Charente qui traduit en partie le lessivage des sols du bassin.

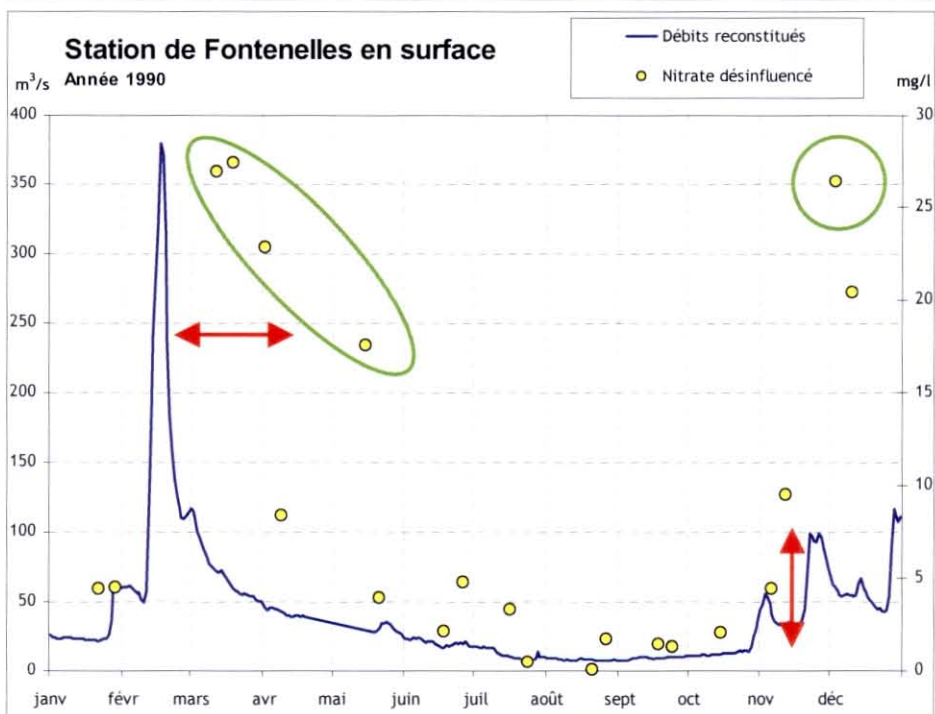
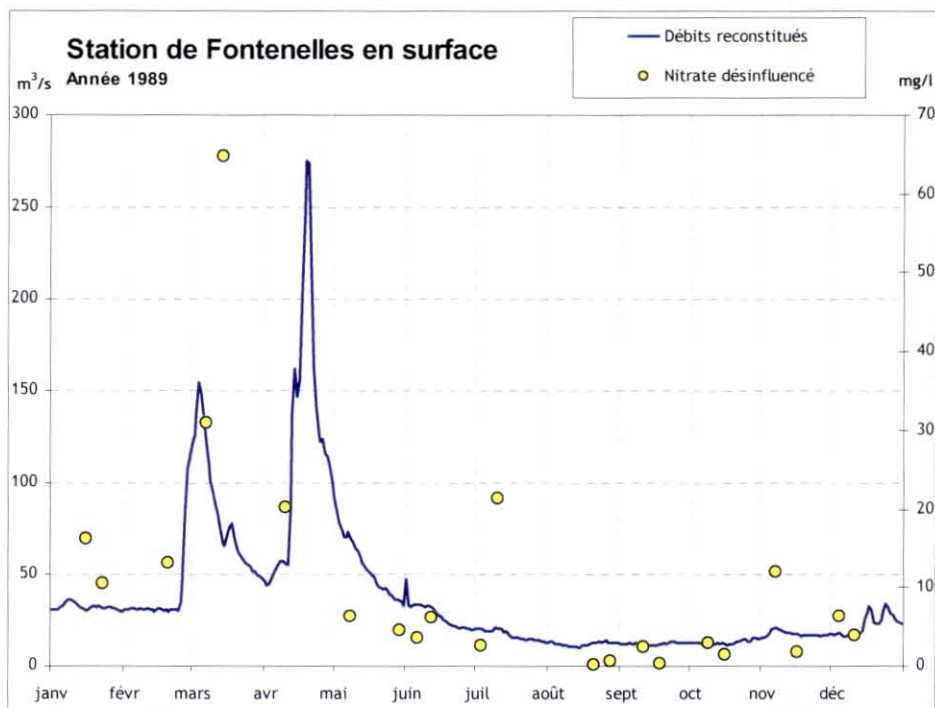


La corrélation est assez faible soulignant l'existence d'autres facteurs explicatifs. En particulier, sur les fortes valeurs de nitrates observées lors de faibles débits de la Charente ou inversement de faibles concentrations en nitrate pour des débits élevés.

L'observation des chroniques de débits met en évidence ces phénomènes.

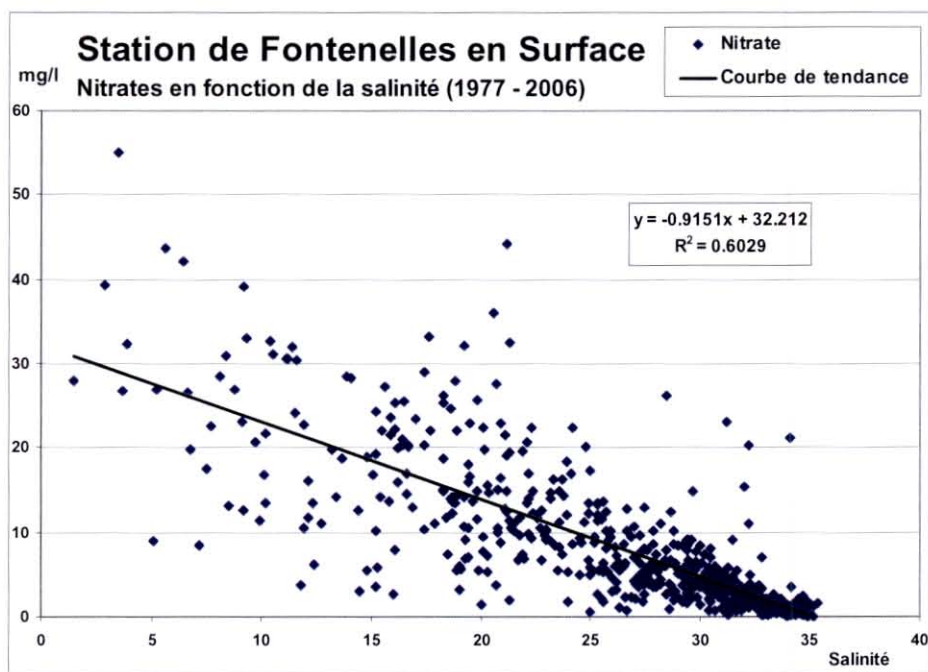
En 1990, on observe que la crue du mois de février conduit à des mesures en nitrate de 20 à 30 mg/l. Un décalage d'environ un mois est observé entre le pic de crue et le pic de nitrate. L'influence de cette crue se fait sentir sur une longue période liée au temps de transfert de l'eau dans le bassin, environ 30 jours entre la source de la Charente et l'estuaire.

L'augmentation des débits au mois de novembre 1990 conduit à des concentrations en nitrate du même ordre de grandeur que lors de la crue de février alors que les débits sont bien plus faibles. En effet, le lessivage est fonction du stock d'azote dans le sol, ce qui met en évidence l'importance de la saison (lessivage d'automne succédant à une mauvaise valorisation du stock par les cultures en cas de sécheresse estivale), parfois plus significatif que la valeur absolue du débit sur la concentration en nitrate dans les rivières.



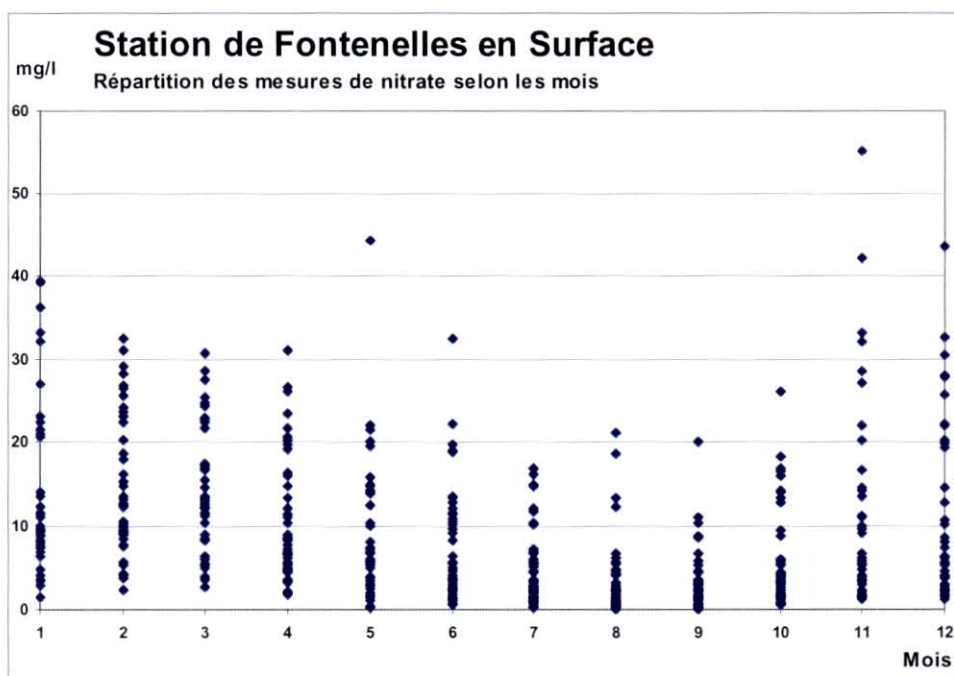
1.1.5. Estimation des flux de nitrate à l'estuaire

L'estimation des flux à l'estuaire peut être obtenue par l'estimation de la courbe de dilution des nitrates, caractérisée par la relation entre la salinité et la concentration en nitrate.

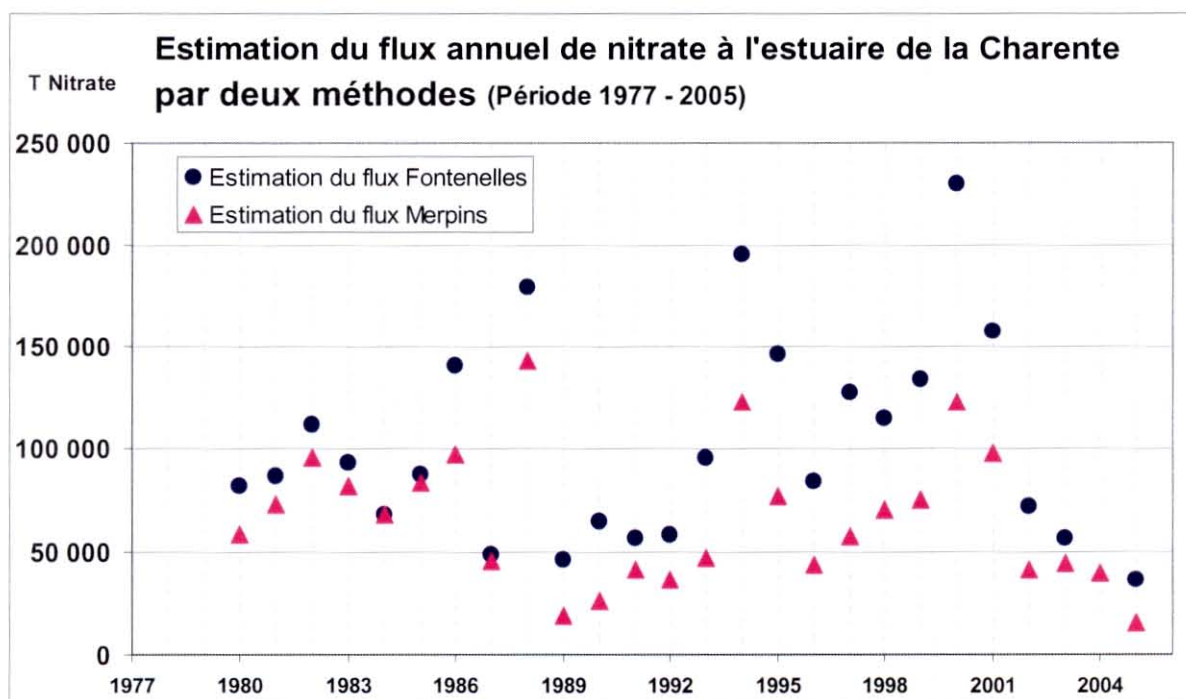


Cette corrélation permet d'estimer la concentration moyenne à salinité nulle. La connaissance du débit moyen sur la période considérée permet ensuite d'estimer les flux.

Cette approche peut être réalisée pour chaque année de mesure, mais aussi pour chaque mois sur l'ensemble de la période d'étude afin de caractériser l'évolution des flux au cours de l'année.



Année	Concentration moyenne théorique	Coefficient de corrélation	Taux de renseignement des débits	Module	Estimation du flux Fontenelles	Concentration moyenne Merpins (RNB)	Nb de mesures	Estimation du flux Merpins
1977	17.19	0.71				15.8	8	
1978	23.41	0.79				14.6	8	
1979	16.36	0.31				19.7	8	
1980	28.00	0.79	100%	91.9	81 134	20.0	8	57 844
1981	25.12	0.44	100%	109.0	86 326	21.1	8	72 599
1982	27.63	0.67	100%	127.6	111 166	23.7	8	95 195
1983	25.85	0.44	100%	114.0	92 905	22.7	8	81 536
1984	20.59	0.62	100%	104.8	68 040	20.6	8	68 083
1985	22.39	0.61	73%	123.1	86 905	21.5	8	83 391
1986	38.80	0.49	100%	114.8	140 530	26.8	8	97 065
1987	20.38	0.63	83%	74.7	48 044	19.1	8	44 958
1988	32.67	0.74	68%	173.9	179 134	26.1	8	142 992
1989	39.20	0.93	100%	37.0	45 772	15.7	8	18 287
1990	49.11	0.94	92%	41.6	64 460	19.4	8	25 496
1991	31.16	0.12	100%	57.8	56 808	22.6	8	41 265
1992	33.62	0.59	93%	54.8	58 138	21.1	8	36 447
1993	48.78	0.87	83%	61.7	94 924	24.1	8	46 822
1994	41.81	0.93	100%	148.0	195 185	26.2	8	122 240
1995	41.79	0.89	100%	110.8	146 070	22.0	8	76 904
1996	34.19	0.82	100%	78.2	84 269	17.8	8	43 905
1997	54.60	0.74	100%	74.0	127 392	24.7	10	57 513
1998	40.25	0.79	100%	90.4	114 799	24.7	10	70 305
1999	43.94	0.76	100%	96.7	134 035	24.6	10	75 048
2000	46.82	0.80	82%	155.7	229 923	25.0	10	122 967
2001	36.33	0.52	100%	137.3	157 323	22.6	10	97 867
2002	39.04	0.65	100%	58.6	72 126	22.4	10	41 385
2003	27.90	0.21	100%	64.4	56 683	21.9	10	44 501
2004			100%	59.1		21.2	10	39 502
2005	40.06	0.96	100%	28.5	36 072	16.7	10	15 000
2006			75%	87.2				
Moyenne :					102 727			

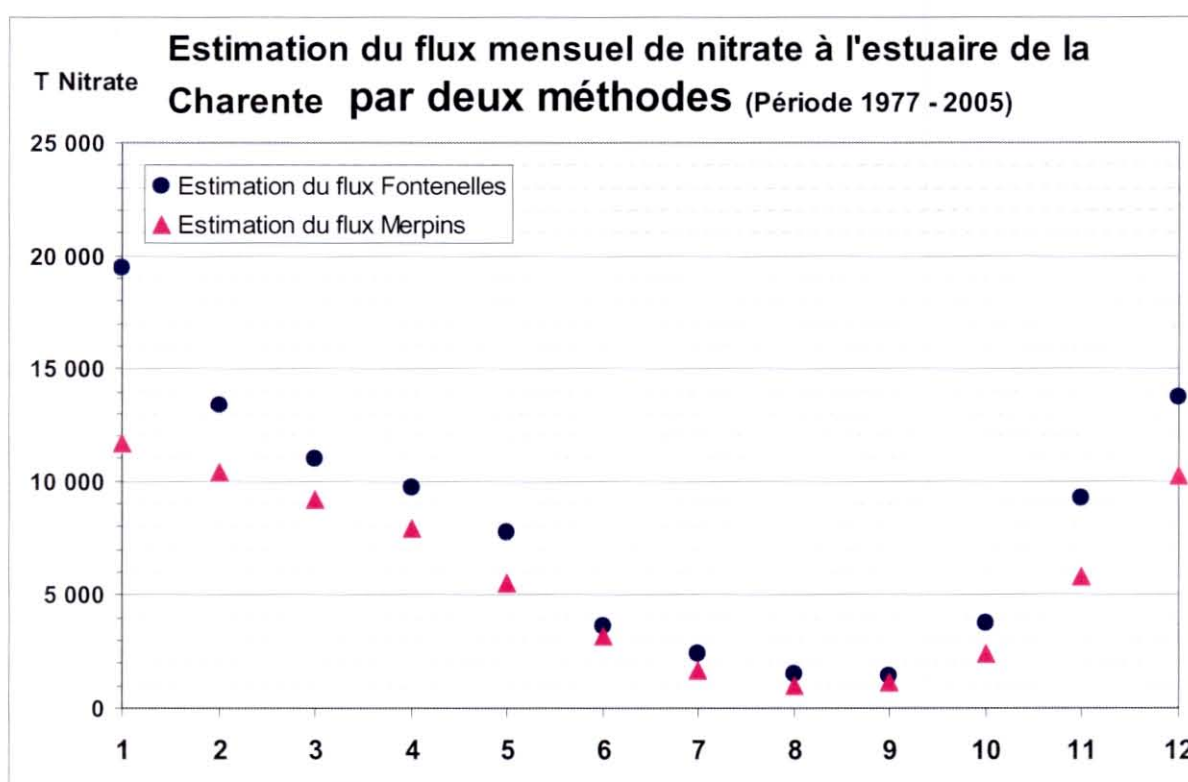


L'analyse des données de la station RNB de Merpins, hors de l'influence de la marée permet d'obtenir une deuxième estimation des flux entrant à l'estuaire. La concentration moyenne annuelle en nitrate de cette station a été multipliée par le module annuel à l'estuaire.

Etant donné les concentrations moyennes en nitrate élevées estimées pour la période 1989-2002, il est probable que la méthode utilisée à partir des données de Fontenelles surestime les

flux, sauf si le flux de nitrate à l'aval du bassin est supérieur aux flux observés à l'amont de Merpins.

Mois	Concentration moyenne théorique	Coefficient de corrélation	Taux de renseignement des débits	Module	Estimation du flux Fontenelles	Concentration moyenne Merpins (RNB)	Nb de mesures	Estimation du flux Merpins
1	38.8	0.62	93%	186.8	19 418	23.3	3	11 639
2	34.5	0.43	94%	155.0	13 383	26.7	13	10 375
3	31.1	0.30	98%	131.4	10 933	26.0	17	9 154
4	30.4	0.48	95%	123.3	9 710	24.7	18	7 883
5	31.2	0.42	95%	92.5	7 721	22.1	29	5 471
6	25.0	0.44	100%	55.2	3 571	21.8	28	3 117
7	26.5	0.61	100%	34.2	2 427	18.0	29	1 645
8	24.4	0.42	100%	22.7	1 489	15.5	23	945
9	22.7	0.35	96%	24.2	1 424	17.9	26	1 125
10	31.3	0.65	89%	45.2	3 785	20.0	23	2 425
11	37.4	0.56	89%	95.4	9 255	23.4	23	5 783
12	37.6	0.73	82%	136.2	13 710	28.0	18	10 212
TOTAL :					96 826			

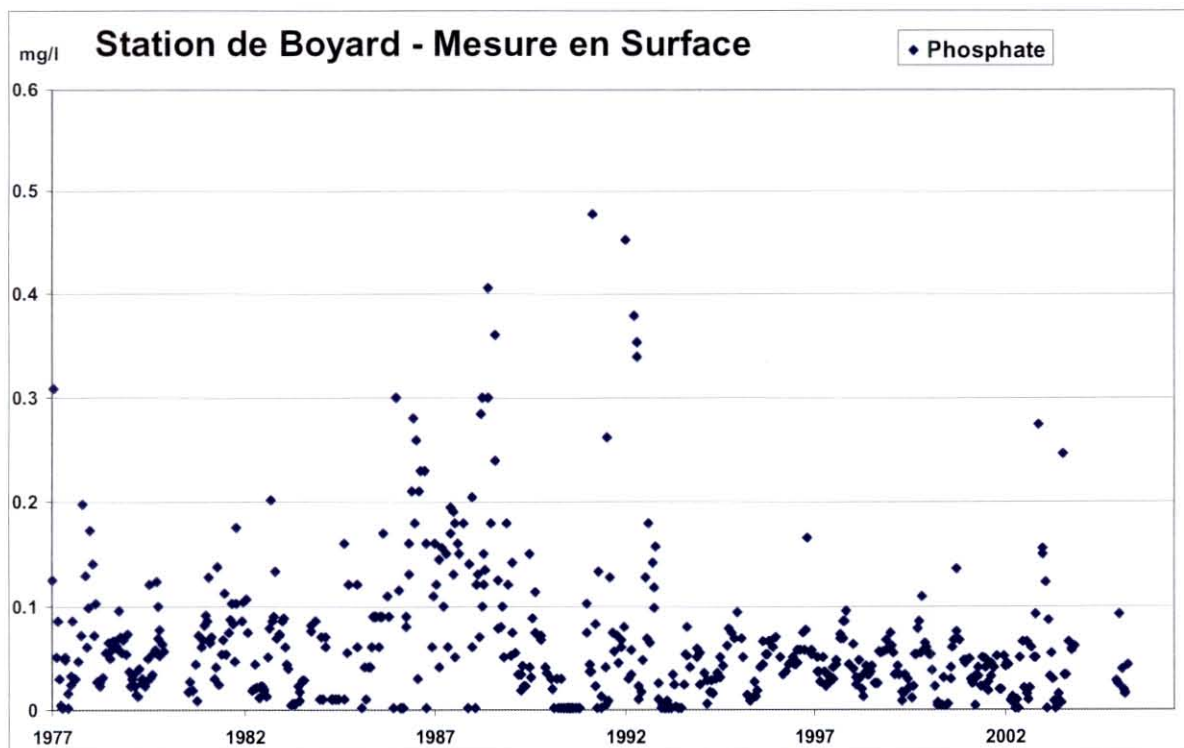
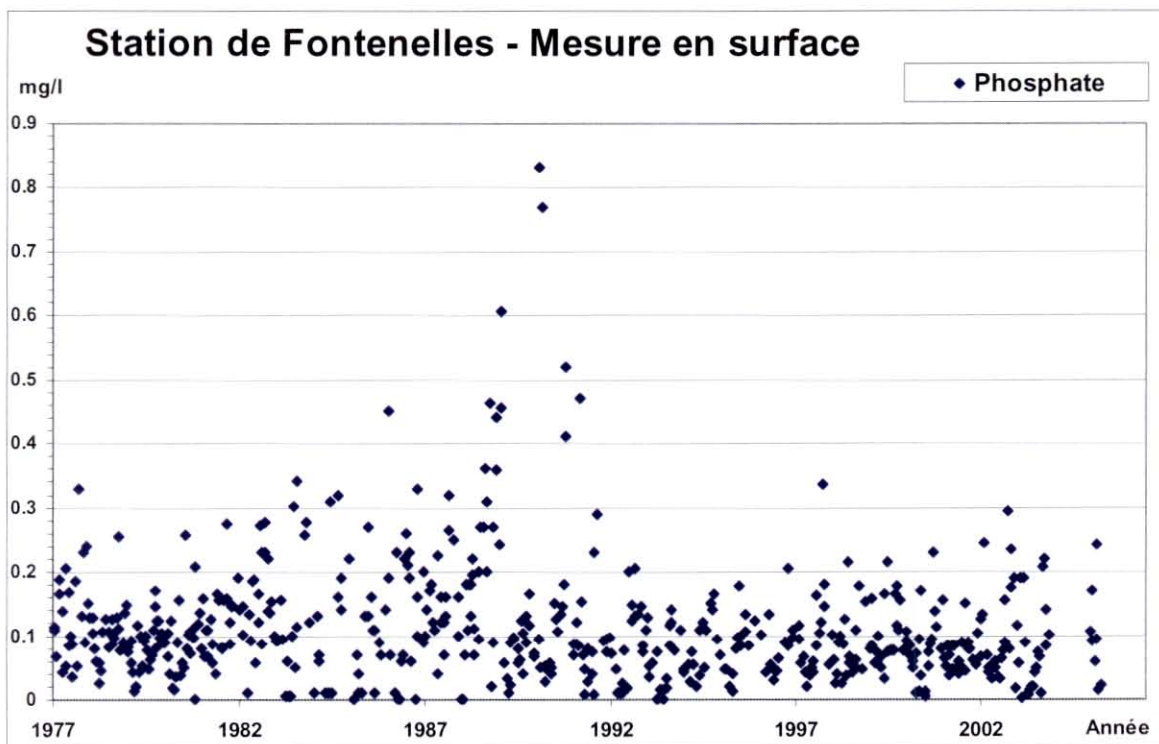


Le graphique ci-dessus montre clairement l'évolution saisonnière des flux de nitrates à l'estuaire. Comme dans l'estimation des flux annuels, l'estimation des flux mensuels à partir de Fontenelles est supérieure à celle obtenue à partir de la station de Merpins.

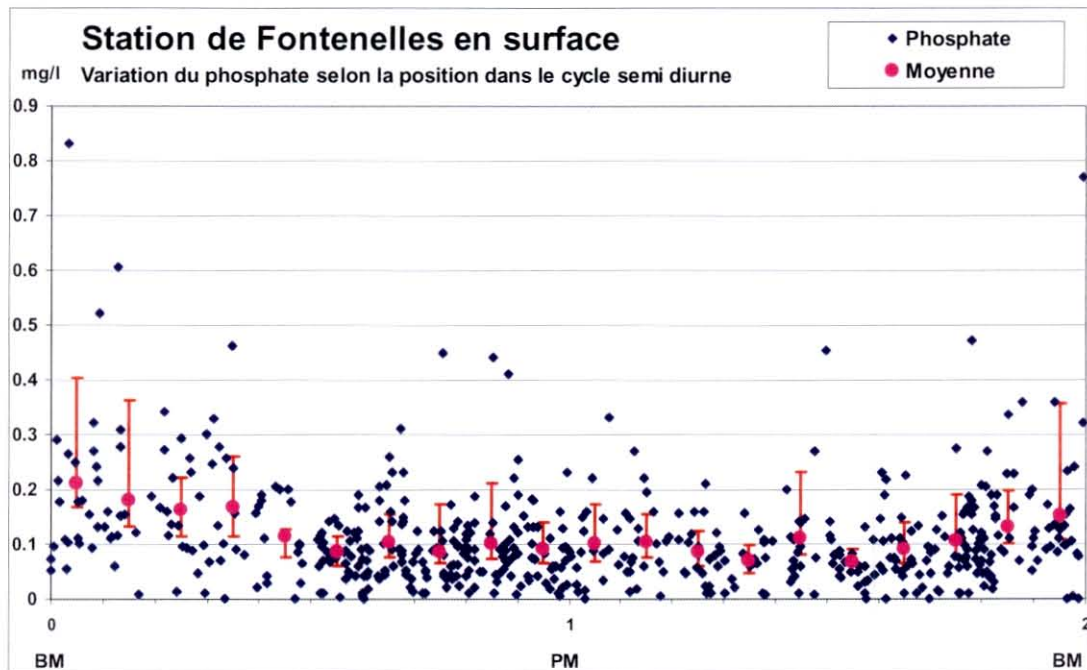
Le nombre de mesures par année est 2 à 3 fois plus important à Fontenelles qu'à Merpins. Cependant, la courbe de dilution utilisée à Fontenelles pour estimer les concentrations en nitrate apportées par la Charente peut être à l'origine d'une surestimation des flux.

5. Le phosphate

Les graphiques suivants montrent que la concentration en phosphate (PO_4^{2-}) à Fontenelles est 2 à 3 fois plus élevée qu'à Boyard. Les apports à Fontenelles sont donc principalement fluviaux. Notons que les valeurs supérieures à 0.6 mg/l nous paraissent suspectes car le phosphate aurait une origine maritime.

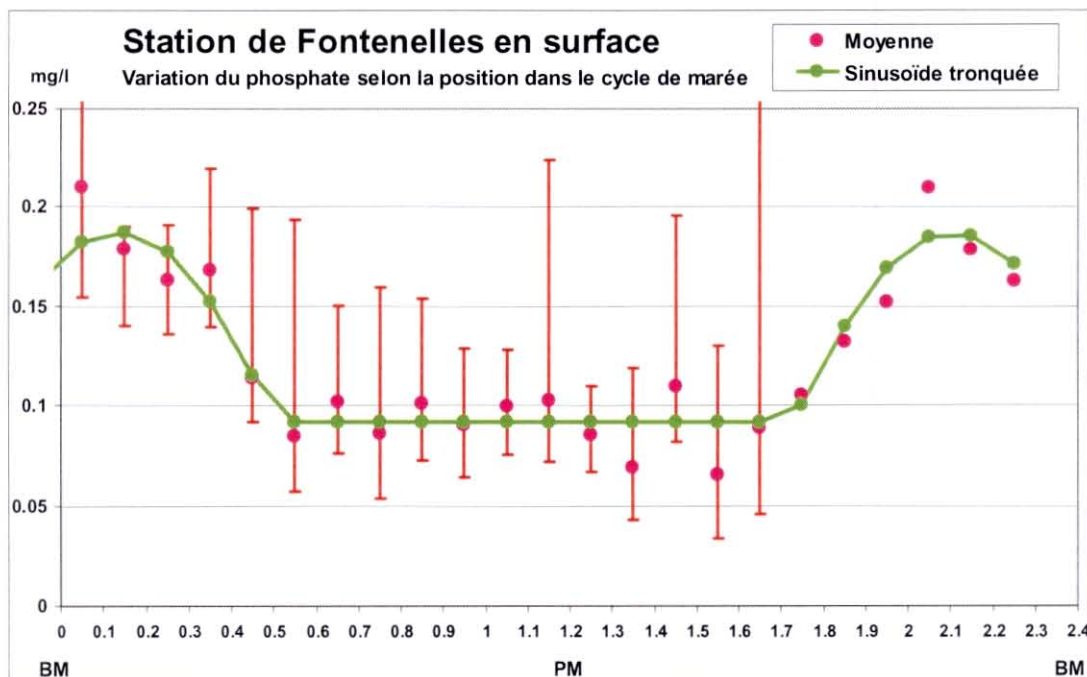


La concentration en phosphate à Fontenelles est également sensible à la position de la mesure dans le cycle de marée.



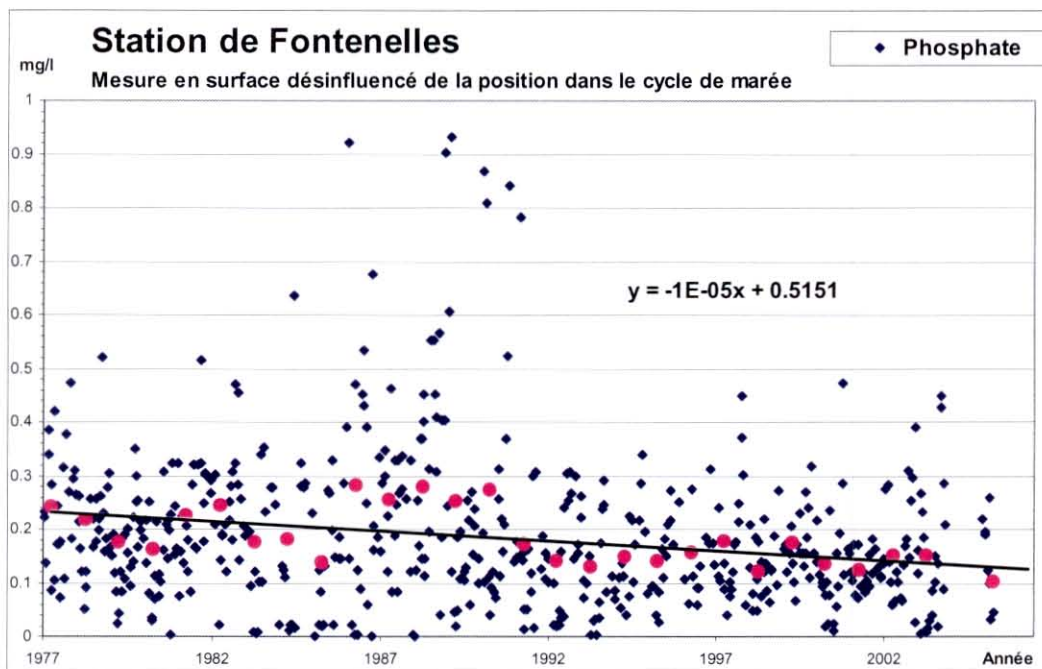
L'équation suivante permet de désinfluencer la mesure du cycle de marée :

- ✓ X : la position de la mesure dans le cycle de marée
- ✓ Moyenne de la concentration en phosphate = $0.034 + 0.152 \cdot \sin(3.18X + 1.15)$
- ✓ Plateau : 0.091
- ✓ Coefficient de corrélation : 0.72

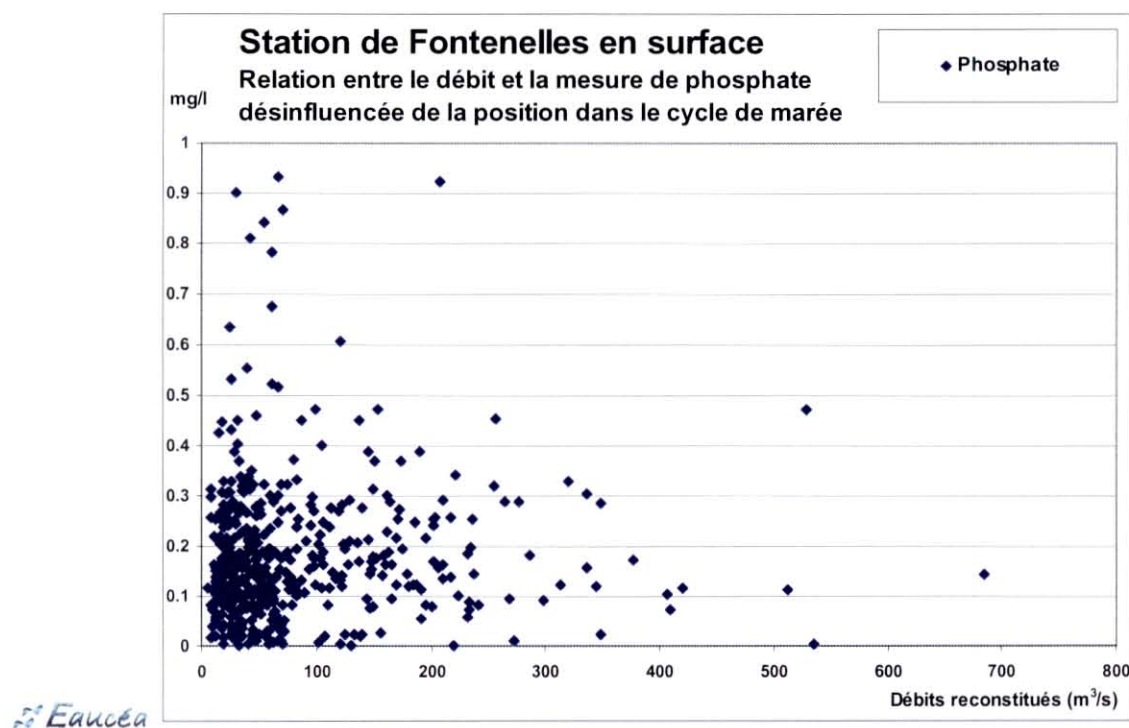


La chronique des mesures de phosphate désinfluencées de la position dans le cycle de marée fait apparaître une nette tendance à la baisse à Fontenelles.

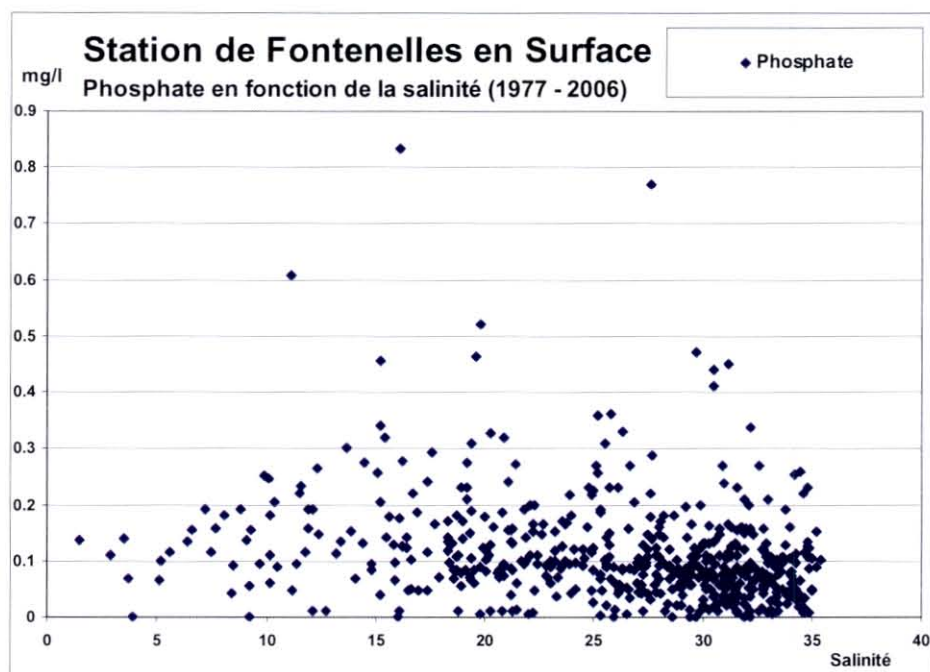
Le coefficient de la courbe de tendance est de -0.00365 par an, avec une valeur initiale en 1977 de 0.23 mg/l. Entre 1977 et 2006, on observe une diminution moyenne de la concentration en nitrate de 0.106 mg/l, soit une réduction d'environ 46% sur la période.



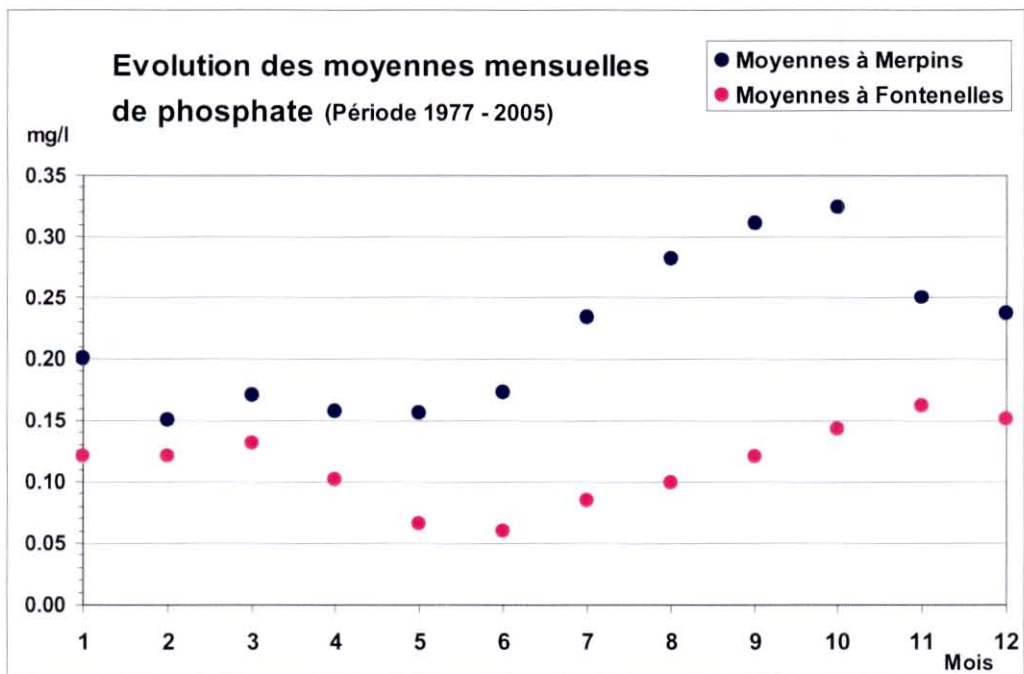
Le graphique suivant montre l'absence de relation évidente entre le débit de la Charente et la concentration en phosphate à Fontenelles. Il semble donc impossible de définir une équation prédictive de la concentration en phosphate à Fontenelles en fonction du débit. Bien que l'essentiel des flux de phosphate soit d'origine anthropique, le cycle de sédimentation et de reprise des phosphates peut perturber totalement la dynamique de dilution.



Contrairement au nitrate, la relation entre la salinité et la concentration en phosphate à Fontenelles ne permet pas de définir une droite de dilution. L'estimation des flux de phosphate à l'estuaire par cette méthode ne peut donc pas être utilisée. Il est vrai que l'écart entre phosphate marin et phosphate fluvial est bien moindre que pour l'azote.

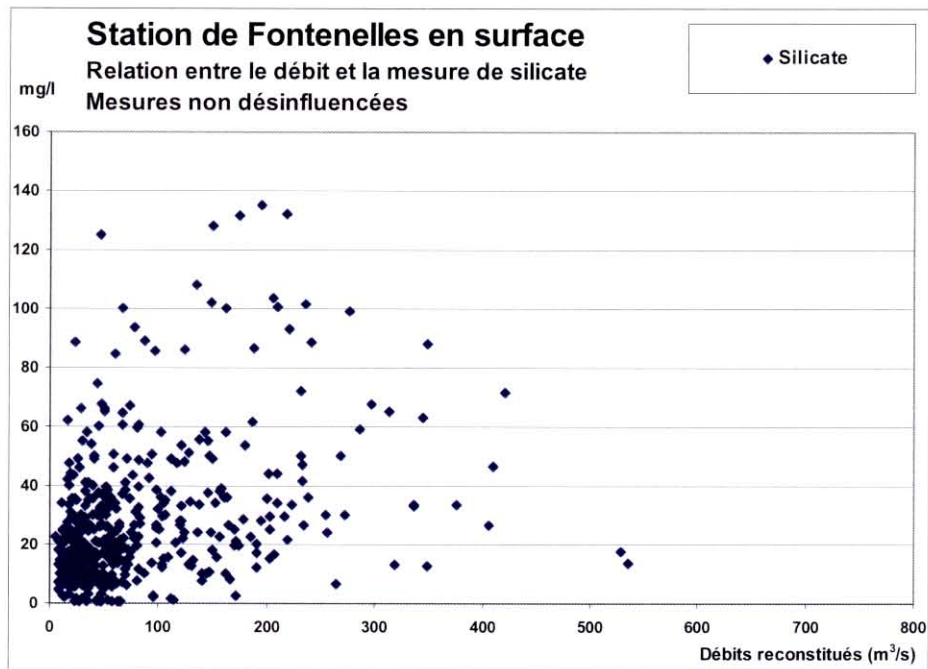


Les flux semblent donc tamponnés par la concentration en phosphate dans les eaux marines comme le suggère le graphique suivant.

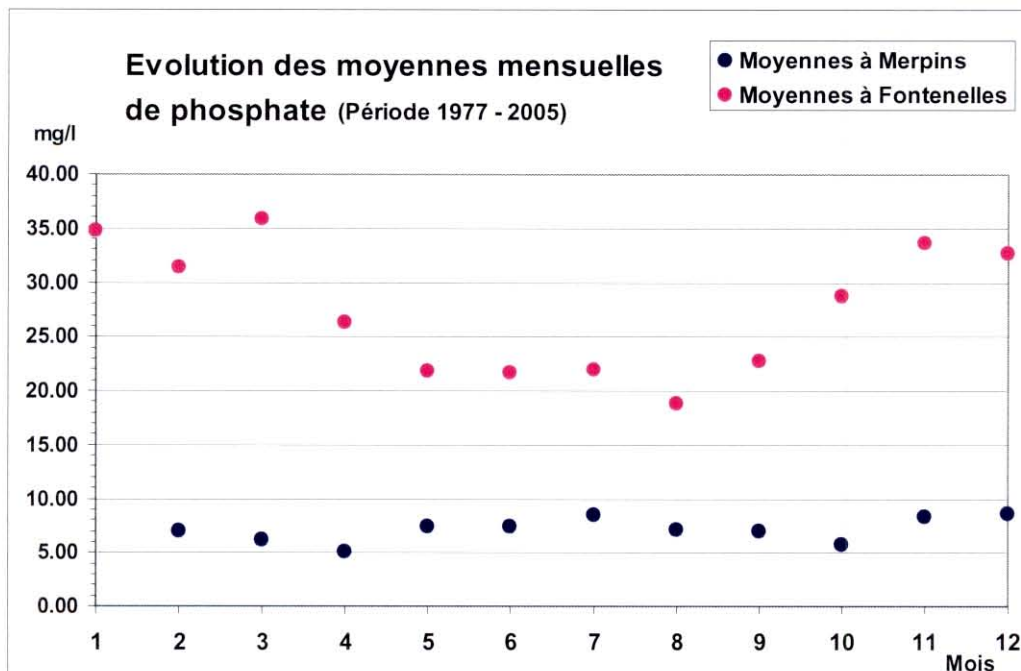


6. Le silicate

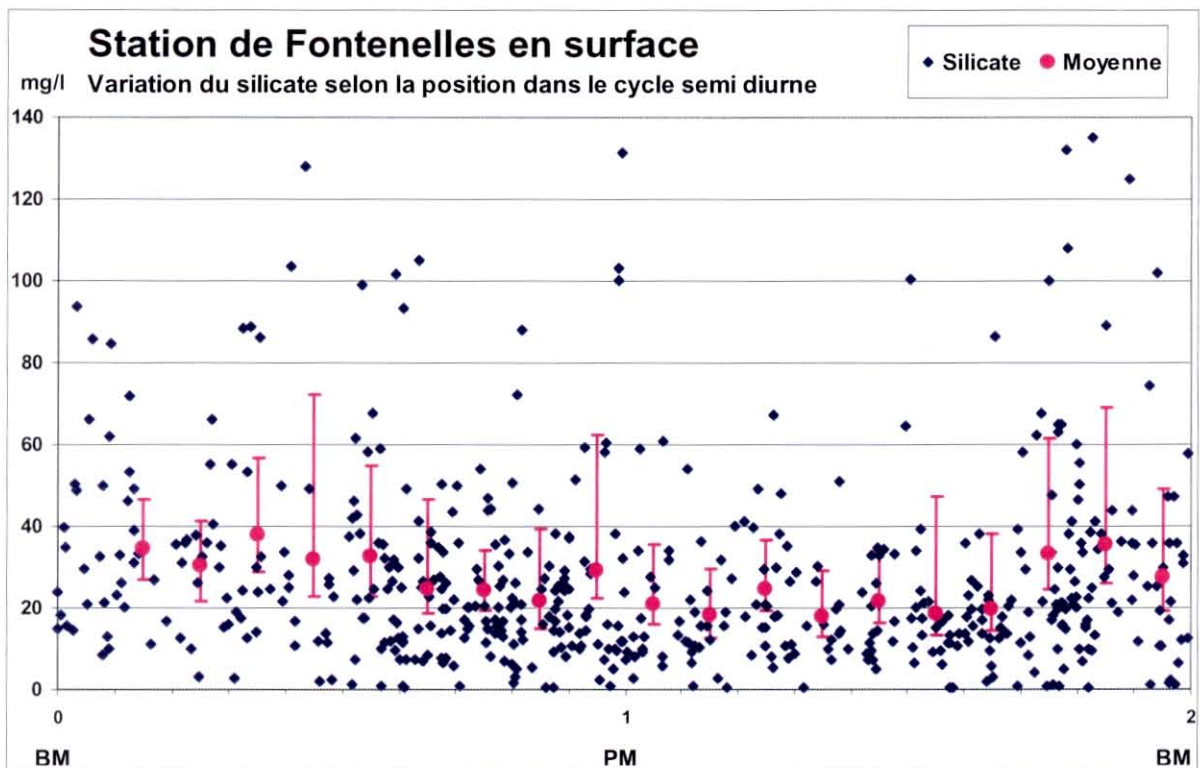
Le graphique suivant montre l'absence de relation nette entre le débit et la concentration en silicate à Fontenelles.



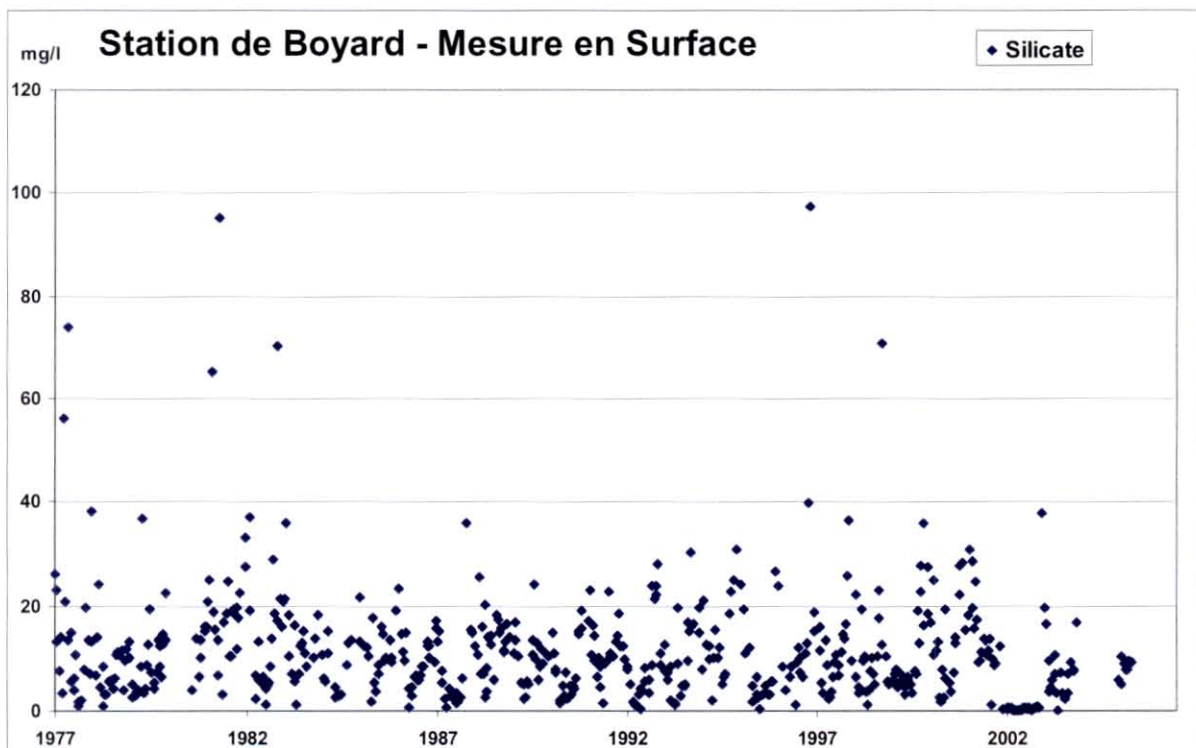
Par ailleurs, le graphique suivant montre une certaine variabilité mensuelle de la concentration en silicate, sans doute lié au développement phytoplanctonique et algal en été. La régularité des apports fluviaux est mise en évidence par les moyennes mensuelles à Merpins. Par contre, il est étonnant d'observer une telle différence de concentration entre les concentrations moyennes à Fontenelles et à Merpins.



La position de la mesure dans le cycle de marée, influence la mesure de la concentration en silicate à Fontenelles, mais de façon moins marquée que pour les autres paramètres.

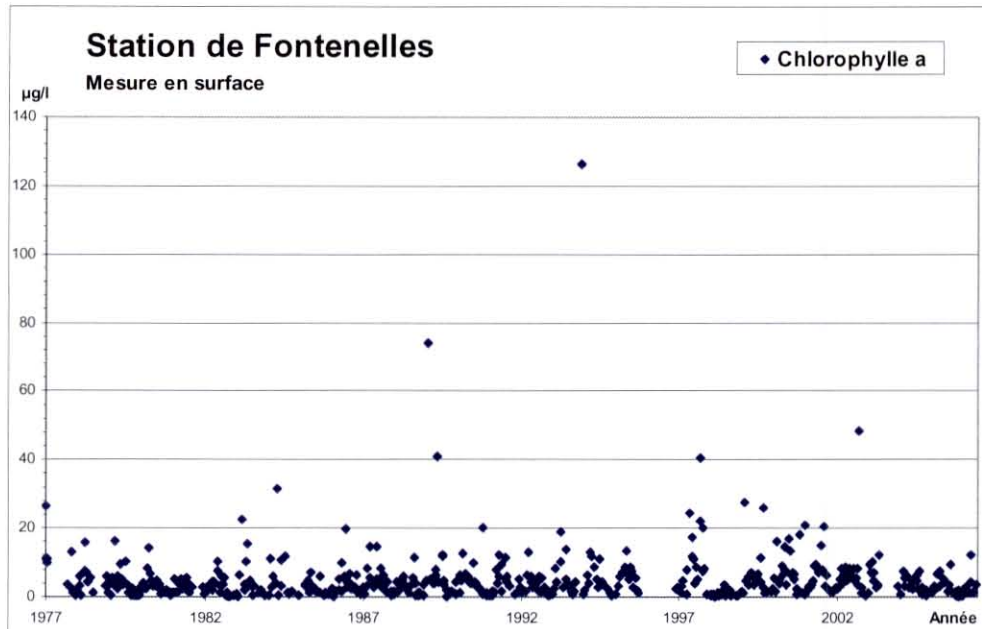


On n'observe pas non plus de tendance interannuelle, ce qui fait des silicates un marqueur stable intéressant. Les flux sont fortement tamponnés par la concentration des eaux marines.

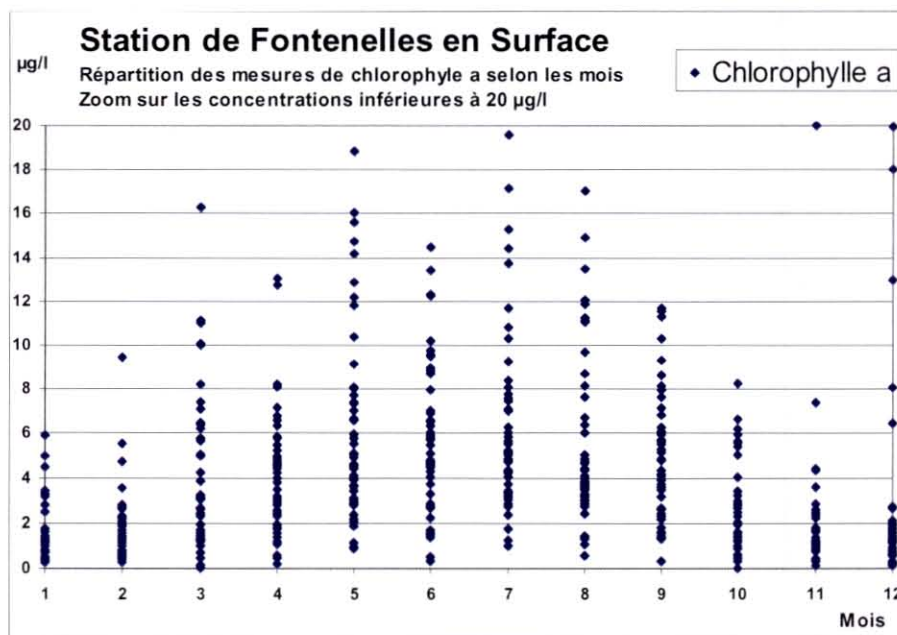


7. La chlorophylle a

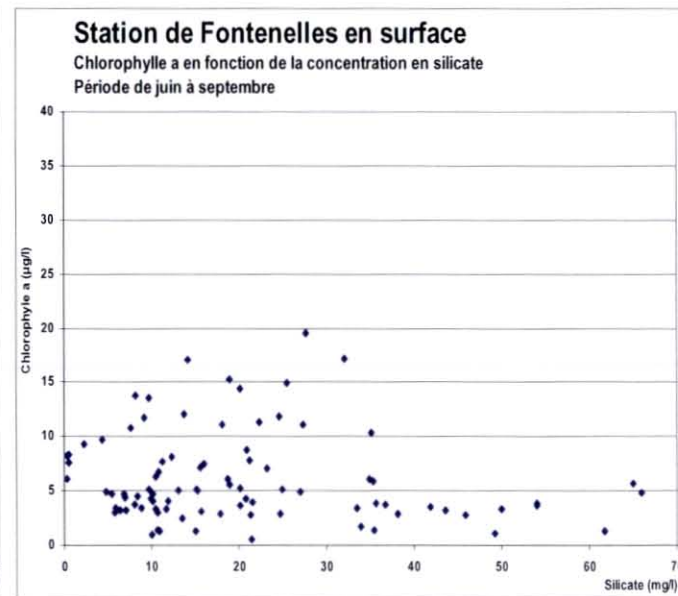
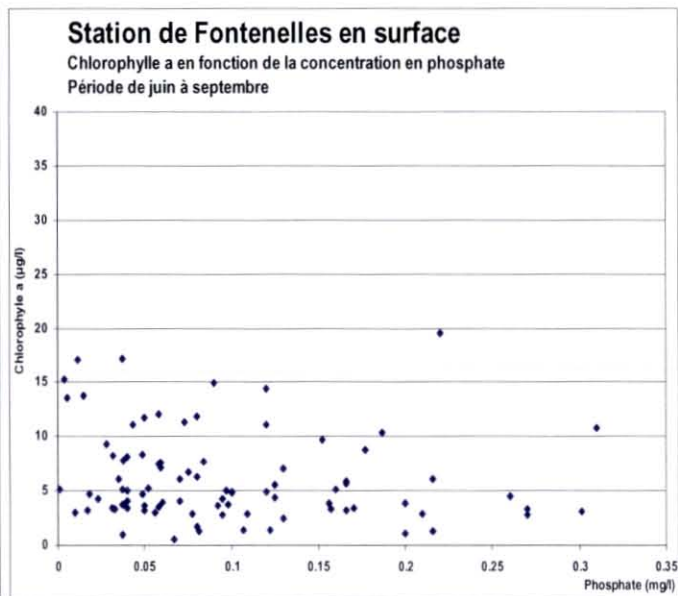
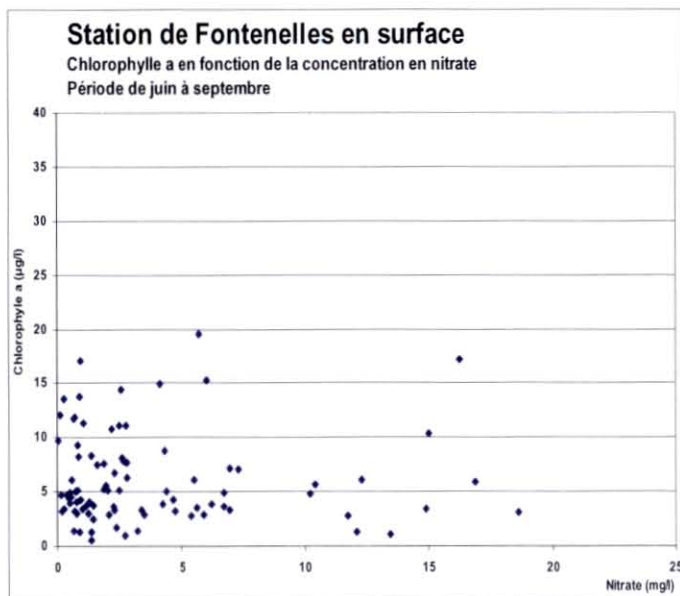
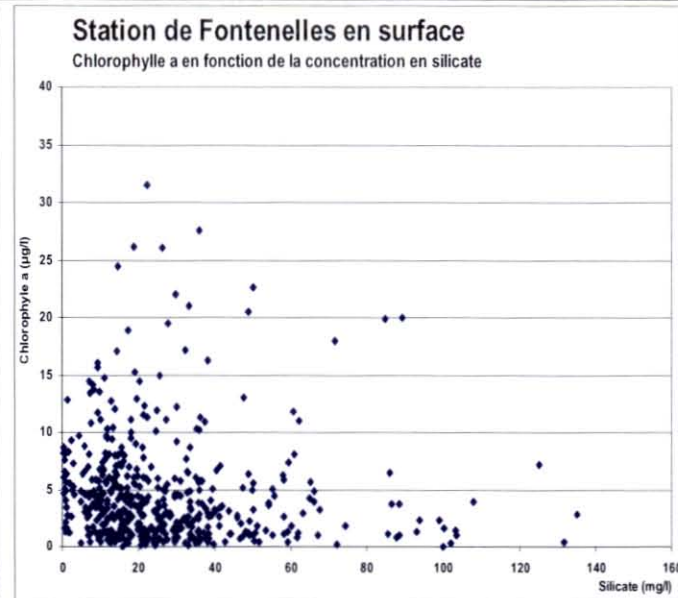
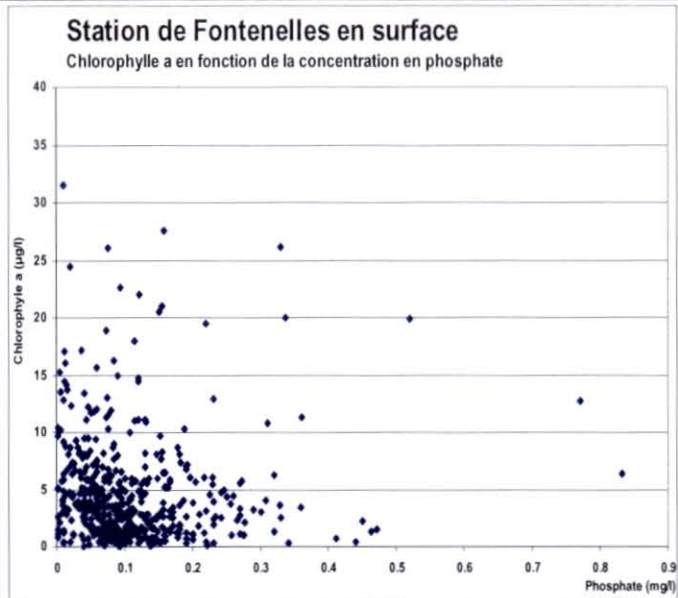
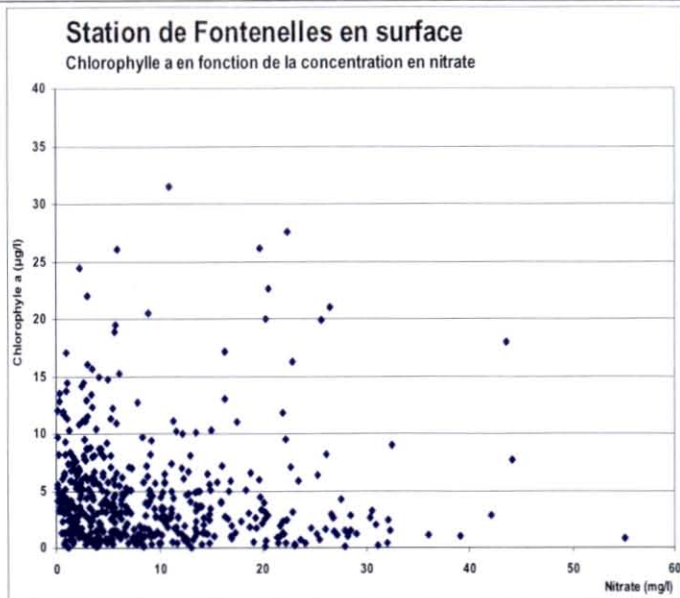
La chronique de mesure présentée dans le graphique ci-dessous montre des concentrations en chlorophylle a relativement faibles, généralement inférieure à 20 µg/l. La concentration est très rarement supérieure à 60 µg/l (« bonne qualité » selon le SEQ EAU), ne mettant pas particulièrement en évidence de phénomène d'eutrophisation.



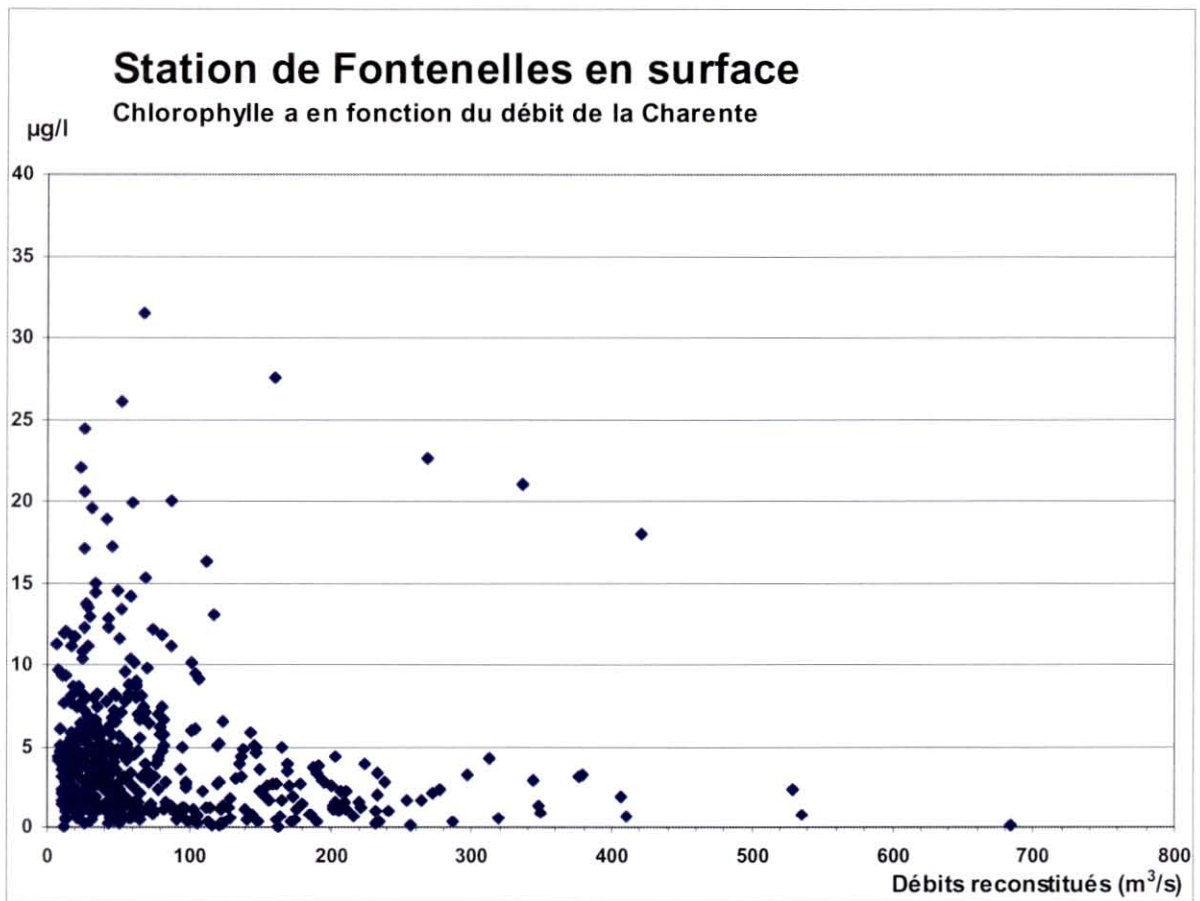
Le graphique suivant montre l'évolution saisonnière de la Chlorophylle a.



Les principaux éléments nutritifs conditionnant le développement algale et du phytoplancton sont le nitrate, le phosphore et la silice. Les graphiques suivants ne permettent pas de mettre en évidence que l'un de ces 3 éléments puisse représenter un facteur limitant de la production primaire à Fontenelles. L'interprétation est cependant délicate car la chlorophylle entre dans un cycle biologique complexe de prédation (brouillage, prédation, ...) contribuant significativement à la cinétique, de même que le phytoplancton agit sur le cycle des nutriments.



Le graphique suivant montre que les plus fortes concentrations en chlorophylle a sont observées lors des faibles débits d'étiage.



CONCLUSION

L'interaction entre eau marine et eau continentale influence de façon significative les paramètres de salinité et de nitrate à Fontenelles.

Les relations établies sur la salinité serviront à affiner les modèles hydrologiques de la Charente qui ne peuvent pas s'appuyer sur de l'hydrométrie traditionnelle. Les flux d'eau douce, notamment en période d'étiage, restent mal connus en raison de leur origine souterraine (apports des nappes) non accessibles à la mesure directe.

La démonstration d'une relation entre la salinité à Fontenelle et les débits de la Charente conforte la pertinence d'une gestion intégrée de la ressource du bassin versant, des karsts et du littoral.