

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS

Spécialité Génie de l'Aménagement et Environnement

Adresse :

35 allée Ferdinand de Lesseps

37200 TOURS, FRANCE

Tél +33 (0)2 47 36 14 62

<http://polytech.univ-tours.fr>

Rapport de stage de fin d'études 2017

Bilan de nutriments dans la retenue d'Esparron

Entreprise :

Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale

Le Tholonet - CS70064

13182 Aix-en-Provence Cedex 5



Tuteur Entreprise:

Agata Sferratore

Expert milieux aquatiques

Tuteur académique:

Francesca Di Pietro

Etudiant :

BATTISTI Karine

DAE 2016-2017

Bilan de nutriments dans la retenue d'Esparron

Résumé :

La retenue d'Esparron est une retenue d'eau artificielle située sur le cours du Verdon dans le département des Alpes-de-Haute-Provence. Elle est le siège d'enjeux importants pour toute la région PACA, pour son alimentation en eau potable et eau d'irrigation, la production d'hydroélectricité et les activités touristiques. L'étude s'insère dans le cadre d'une action du contrat de rivière Verdon, menée par la Société du Canal de Provence, en collaboration avec le Parc Naturel Régional du Verdon.

Le bilan de nutriments dans la retenue a permis de mettre en évidence un enrichissement en azote et phosphore à l'échelle annuelle. Les sources d'apport sont principalement le Verdon, les apports diffus ainsi que les rejets issus des STEP (influencés par l'accroissement de population en période estivale). Une partie de nutriments présents dans la retenue est absorbée par la végétation aquatique.

L'étude du stade trophique a permis de confirmer l'état oligotrophe de la retenue. Cela laisse penser qu'une partie des nutriments présents dans le plan d'eau, intègre les sédiments. Ils constituent ainsi une charge interne à la retenue qui peut être libérée dans le cas du phosphore, dans des conditions anoxiques, conditions observées sur certains profils d'oxygène.

Le protocole d'évaluation DCE de l'état écologique du plan d'eau a été appliqué pour chaque station échantillonnée sur l'année d'étude et a conclu à une bonne représentativité du point unique de mesure réalisée par l'Agence de l'Eau.

Mots-clés :

Retenue d'Esparron, bilan de nutriments, azote, phosphore, état trophique, variabilité spatiale, variabilité temporelle, représentativité état DCE

Abstract :

Lake Esparron is an artificial dam located on the Verdon river, in the Alpes de Haute-Provence Department. This lake is a strategic water resource for the entire PACA region for drinking and irrigation water supply, for hydropower and touristic activities. The study is a part of an action of the river contract Verdon, carried out by Société du Canal de Provence in collaboration with Parc Naturel Régional du Verdon to provide some elements of responses to the proliferation of aquatic vegetation.

The nutrient balance and contributions to Lake Esparron reveal the water enrichment by nitrogen and phosphorus compounds on an annual scale. The main sources are the river Verdon, the diffuse sources and discharge from WWTPs (influenced by population growth during summer period).

The study of the trophic status has confirmed the oligotrophic level of Lake Esparron. It lets think that a part of nutrient integrate sediments. They represent then an intern charge within the lake and can be released under anoxic conditions. These conditions have been observed sometimes on oxygen profiles.

The WFD protocol to determine the ecological status of a water body has been applied on every station during a year campaign, and helped to conclude that the unique station sampled by the Water Agency is representative of the entire lake status.

Keywords:

Lake Esparron, nutrients balance, nitrogen, phosphorus, trophic status, spatial variability, temporal variability, representativeness status WFD

REMERCIEMENTS

Je remercie tout particulièrement Agata SFERRATORE (Expert milieux aquatiques, Société du Canal de Provence) ma tutrice de stage, qui m'a guidé tout au long de ce stage avec beaucoup d'écoute et de disponibilité. Ses conseils judicieux tout au long de nos échanges qui m'ont permis d'alimenter ma réflexion et de construire ce travail.

Je remercie Francesca DI PIETRO enseignante à l'Ecole d'Ingénieur Polytech Tours et ma tutrice pédagogique, qui m'a fourni les outils nécessaires tout au long de mes années d'étude pour mener à bien ce projet.

Mes remerciements s'adresse à Vincent ROUBEIX (Chercheur, Pôle AFN/Irstea Hydroécologie des plans d'eau, Aix-en-Provence) et Pierre-Alain DANIS (Ingénieur responsable des thèmes physico-chimie et thermie Pôle AFN/Irstea Hydroécologie des plans d'eau, Aix-en-Provence), pour leurs précieux conseils et leurs avis d'experts sur ce projet. Ils m'ont permis d'apporter un sens critique à l'étude, dans le choix des méthodes, des données et des calculs.

Je remercie également Loïc DUFFAR (Ingénieur hydrologue, Société du Canal de Provence) pour ses conseils avisés dans l'élaboration du bilan hydrique.

Je tiens aussi à remercier Céline LE FLOCH et Christelle GRIES GOSALBES (Géomaticiennes, Société du canal de Provence) pour leur aide précieuse pour l'utilisation de logiciels SIG, pour leur patience et leurs disponibilités.

Je remercie aussi Pierre PHAN DONG (Technicien, Société du Canal de Provence) qui a réalisé la plupart des relevés pour cette étude, pour sa disponibilité et son retour sur les protocoles des échantillonnages.

Merci également à Florence PELLEGRINI, (Technicienne en laboratoire, Société du Canal de Provence) pour son aide quant aux données issues des analyses de laboratoire et pour le temps précieux que j'ai pu gagner grâce à ses conseils sur des techniques de calcul de nutriments.

Je remercie également Pauline TROUILLER, Alexandre DA COSTA, Paul ZUNINO et Coralie WELSCH pour l'entraide et les moments de convivialité que nous avons partagés.

Enfin je remercie toutes les personnes qui ont participées à l'élaboration de ce projet.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	3
1.1	Contexte et enjeux	3
1.2	Objectifs de l'étude	3
2	PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE	5
2.1	Localisation	5
2.2	Caractéristiques physiques	6
2.3	Caractéristiques hydrologiques du site	7
2.4	Les caractéristiques géologiques	7
2.5	Occupation du sol	8
2.6	Les usages et enjeux économiques et sociaux	8
2.7	Le cadre réglementaire	9
2.8	Méthodologie générale de l'étude	11
2.8.1	Choix et fréquence des stations d'échantillonnage	11
2.8.2	Mesures réalisées	12
2.8.3	Détermination du bassin versant à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)	13
2.8.4	Le bilan hydrique	13
3	BILAN DES APPORTS DE LA RETENUE D'ESPARRON	14
3.1	Apports atmosphériques	16
3.2	Apports par le bassin versant	16
3.3	Apports par le Verdon	18
3.4	Evaluation des apports ponctuels	18
3.5	Les pertes par le canal mixte	20
3.6	Les pertes par le débit réservé	20
3.7	Estimation de l'absorption par la végétation aquatique	21
3.8	Bilan des charges et conclusions	22
4	ANALYSE DE LA VARIABILITE DES ELEMENTS NUTRITIFS	23
4.1	Limnologie : Fonctionnement général de la retenue d'Esparron	23
4.2	Etude de la représentativité du point unique de mesure réalisé par l'Agence de l'eau. 27	
4.2.1	Le protocole DCE d'évaluation des masses d'eau	27
4.2.2	Transposition du protocole à la campagne de mesure de la retenue d'Esparron	28
5	DISCUSSION	30

5.1	Bilan de la retenue	30
5.1.1	- Les principales sources d'apports et domaines d'action.....	30
5.1.2	Rôle de la végétation aquatique dans la retenue d'eau et éléments de gestion 31	
5.2	Etat trophique et Evolution de la retenue d'Esparron	32
5.2.1	Généralités sur l'état trophique d'un lac	32
5.2.2	Le stade trophique de la retenue d'Esparron.....	33
5.2.3	Elément limitant	33
5.3	Représentativité du point unique de mesure : discussion sur la pertinence des indicateurs.....	36
6	CONCLUSION	38
	BIBLIOGRAPHIE.....	39
	Table des figures.....	42
	Table des tableaux	42
	ANNEXES.....	43

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et enjeux

L'eau est un bien précieux nécessaire à la vie et au développement de nos activités. C'est une ressource limitée et renouvelable mais qui reste fragile. Elle fait l'objet d'une préoccupation particulière dans un contexte de changement climatique.

En Région PACA, malgré l'abondance de la ressource à l'échelle annuelle, l'eau reste un enjeu de préoccupation de par la grande sollicitation dont elle fait l'objet et de par sa fragilité en situation d'étiage pendant les mois de sécheresse estivale.

Le territoire traversé par le Verdon a une importance particulière au niveau régional. Ce cours d'eau a commencé à être aménagé dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle. La loi du 5 avril 1923 a permis la constitution de réserves sur le Verdon, en vue d'assurer le développement de l'irrigation, l'amélioration de l'alimentation en eau potable de nombreuses villes, et la production d'hydroélectricité. Le cours d'eau est ainsi marqué par la présence de 5 barrages hydroélectriques qui forment des retenues d'eau aux volumes de stockage plus ou moins importants.

Le lac d'Esparron, objet de cette étude, constitue la dernière retenue, après le lac de Castillon, la retenue de Chaudanne, le lac de Sainte Croix et la retenue de Quinson.

La qualité de l'eau du Verdon est qualifiée de bonne, mais de nombreux facteurs liés aux usages présents sur le bassin versant exercent des pressions sur la ressource qui pourraient en altérer la qualité. Celle-ci est un enjeu prioritaire en termes de gestion pour le parc Naturel Régional du Verdon (PNRV), et aussi pour la Société du Canal de Provence, dont le Verdon constitue la principale ressource amont, en vue de l'alimentation en eau brute des territoires en aval.

Depuis quelques années, une croissance accrue de plantes aquatiques dans les retenues a été constatée. Cette prolifération altère certains usages et fait l'objet d'une étude menée par la Société du Canal de Provence en collaboration avec le PNRV : « Réhabilitation des plans d'eau du Verdon envahis par la végétation aquatique ». De nombreux facteurs peuvent être à l'origine de ce développement accru. Connaître le mode de fonctionnement des retenues, le cycle des nutriments et les phénomènes biologiques dont elles font l'objet permettra d'assurer une gestion durable de la ressource tout en conservant et développant les usages qui lui sont associés.

1.2 Objectifs de l'étude

L'étude s'insère dans le cadre d'une action du contrat de rivière Verdon, liée à la réhabilitation des plans d'eau du Verdon à usages multiples. Ce travail s'organise en 2 parties qui détaillent les 2 principaux objectifs:

- **Bilan des apports de la retenue d'Esparron ;**

L'objectif de cette première partie est d'évaluer les différents apports entrants et sortants afin de réaliser une **synthèse de l'état de la retenue** et ainsi **établir un état zéro**.

Cette première partie permettra également d'évaluer la relation entre l'usage du territoire et la qualité des eaux.

Pour cela, une analyse des différents compartiments (bassin versant, tributaires, apports ponctuels..) qui composent le système est réalisée. Il s'agit de quantifier les flux d'eau de

chaque compartiment pour réaliser un bilan hydrique de la retenue puis d'évaluer les flux de nutriments associés.

- **Analyse de la variabilité des éléments nutritifs ;**

L'objectif de cette deuxième partie est d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des éléments nutritifs. Il s'agit d'apporter des connaissances sur le mode de fonctionnement de la retenue, le cycle des nutriments et des processus physico-chimiques qui la régissent. La représentativité du point unique de mesure est ensuite discutée et comparée aux résultats de la campagne de terrain.

L'étude permettra in fine d'apporter une meilleure connaissance du fonctionnement de la retenue d'Esparron et d'orienter les objectifs de gestion pour protéger et valoriser la ressource en eau.

« Le territoire du parc naturel régional constitue l'un des châteaux d'eau de la Provence. La rivière Verdon en représente l'axe principal... »

- Charte du Parc Naturel Régional du Verdon -

2 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE

2.1 Localisation

Le lac d'Esparron est une retenue artificielle, mise en eau en 1967, à la suite de la construction du barrage de Gréoux. La retenue d'eau s'insère en cinquième position dans un complexe hydroélectrique de barrages implantés le long du cours d'eau du Verdon.

Ainsi les barrages de Castillon, Chaudanne, Sainte-Croix, Quinson et Esparron jalonnent le cours du Verdon à travers ses 3 sous bassins versants : le Haut-Verdon, le Moyen-Verdon et le Bas-Verdon.

Le bas Verdon est délimité par la queue de la retenue de Sainte-Croix et la confluence Verdon-Durance. La retenue de l'Esparron située dans ce dernier sous-bassin versant, est localisée dans le département des Alpes-de-Haute-Provence, près du village d'Esparron-de-Verdon.

La retenue est délimitée en amont par le barrage de Quinson et en aval par le barrage de Gréoux (Figure 1).

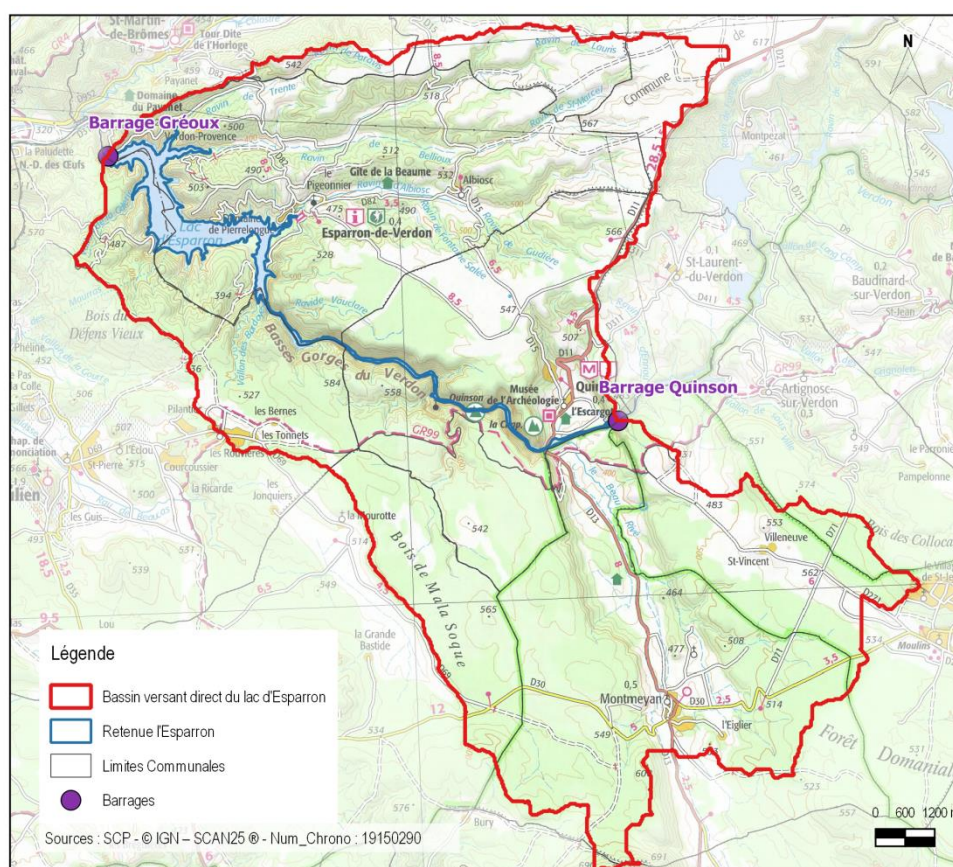


Figure 1: Délimitation de la retenue d'esparron

2.2 Caractéristiques physiques

La retenue d'Esparron a une superficie d'environ 3 km², pour un volume de stockage de 80Mm³ environ. Ce réservoir est caractérisé par :

- Sa morphologie allongée (13.5 km de long) qui définit trois tronçons aux caractéristiques différents :
 - La Baie de Quinson, située en amont de la retenue après le barrage de Quinson, d'une longueur de 1.5 km pour 100 m de large en moyenne.
 - Les gorges représentent la partie la plus encaissée de la retenue d'une longueur de 7 km pour 60 m de largeur moyenne.
 - La baie d'Esparron est la partie la plus large de la retenue d'une longueur de 5 km et 700 m de large.
- Son marnage très faible, de l'ordre de 1 m à l'échelle annuelle.
- Un débit moyen annuel entrant variable assuré essentiellement par le Verdon à travers l'usine hydroélectrique de Quinson.

Les caractéristiques physiques de la retenue d'Esparron sont résumées dans le tableau suivant, issues d'une récolte de données bibliographiques (Tableau 1) :

Tableau 1 : Caractéristiques physiques de la retenue d'Esparron

Critères	Plan d'eau d'Esparron
Code lac	X2625003
Masse d'eau	FRDL89
Département	04 (Alpes-de-Haute-Provence)
Latitude	43°44' Nord
Longitude	5°58' Est
Altitude	359 m NGF
Type	Artificielle
Origine	Barrage du Verdon - Mise en eau en 1967
Typologie	A3=retenue de moyenne montagne calcaire profonde
Superficie	302,80 ha
Volume	80 Mm ³
Distance à la source	135 km
Longueur	13,5 km
Profondeur max	54 m
Marnage	~ 1 m
Bassin versant propre	140,33 km ²
Alimentation	le Verdon
Emissaire	le Verdon
Temps de renouvellement	25 jours
Date de renouvellement de la concession	31/12/2043

2.3 Caractéristiques hydrologiques du site

La retenue d'Esparron est principalement alimentée par le Verdon. Affluent rive gauche de la Durance, il prend sa source à 2325 m au pied de la Tête de la Sestrière, entre le col d'Allos et le pic des Trois-Evêchés et se jette dans la Durance près de Vinon-sur-Verdon, après avoir parcouru 165,7 kilomètres.

Le régime naturel du Verdon est pluvio-nival avec un débit moyen annuel de 39.5 m³/s. Cependant, le régime réel du Verdon est très irrégulier. Il est en effet soumis aux turbinages des usines hydroélectriques des barrages les plus amonts (Castillon et Chaudanne). Il peut ainsi passer en une journée de 0.5 m³/s (débit réservé) à 42 m³/s (turbinage maximal)¹.

Le reste du réseau hydrographique de la retenue est composé par une rivière intermittente, le Beau Rivé qui draine la commune de Montmeyan et des petits ruisseaux (Annexe 1).

Le réseau hydrographique des tributaires du bassin versant propre de la retenue d'Esparron représente un linéaire total d'environ 58 km.

Trois ravins principaux débouchent dans le lac d'Esparron : le ravin de Trente au Nord, le ravin de Bellioux et le ravin d'Albiosc situés rive droite de la retenue. Les deux premiers drainent les zones cultivées du bassin versant : le sommet des collines et le plateau de Valensole.

Au sud se trouvent seulement des ravins courts et abrupts et le vallon de Bardoyes.

2.4 Les caractéristiques géologiques

Deux grandes formations géologiques composent le territoire d'étude :

- au nord une petite partie du territoire est composée par des conglomérats et des argiles ;
- le secteur de la retenue d'eau et le sud du bassin versant sont composés essentiellement de calcaires plus ou moins karstiques et fracturés.

Ce contexte géologique a une grande influence sur la réserve en eau et les transferts entre la surface et les réservoirs souterrains. Plusieurs cas de résurgences ont été constatés notamment dans le lac de Sainte-Croix.

Cette caractéristique rend l'analyse du fonctionnement hydrologique du site complexe pour quantifier les pertes et apports associés à l'infiltration.

¹ Source : <http://parcduverdon.fr/fr/gestion-de-leau/debits-reserves>

2.5 Occupation du sol

L'analyse de l'occupation du sol sur le bassin versant direct de l'Esparron (Annexe 2) montre une répartition du sol assez homogène (Figure 2). Le recouvrement est caractérisé par deux principales composantes:

- environ **70%** du territoire est composé de **milieu forestier** (dont 42% de forêt de feuillus, 14% de forêt et végétation arbustive en mutation, 12% de forêt mélangée et 1.4% de forêt de conifères) davantage localisées au sud du bassin versant.
- **21%** du territoire est représenté par un **milieu agricole** (dont 14% de terres arables hors périmètre d'irrigation, 2.5% de plantes à parfum aromatiques et médicinales et le reste réparti entre les oliveraies, vignobles et arboriculture, localisées davantage sur la partie nord du bassin versant.

Le territoire d'étude est très peu urbanisé, seulement **3,3%** du recouvrement présente des **espaces urbanisés** avec essentiellement des espaces de bâti diffus ainsi que du tissu urbain discontinu. C'est un territoire essentiellement rural.

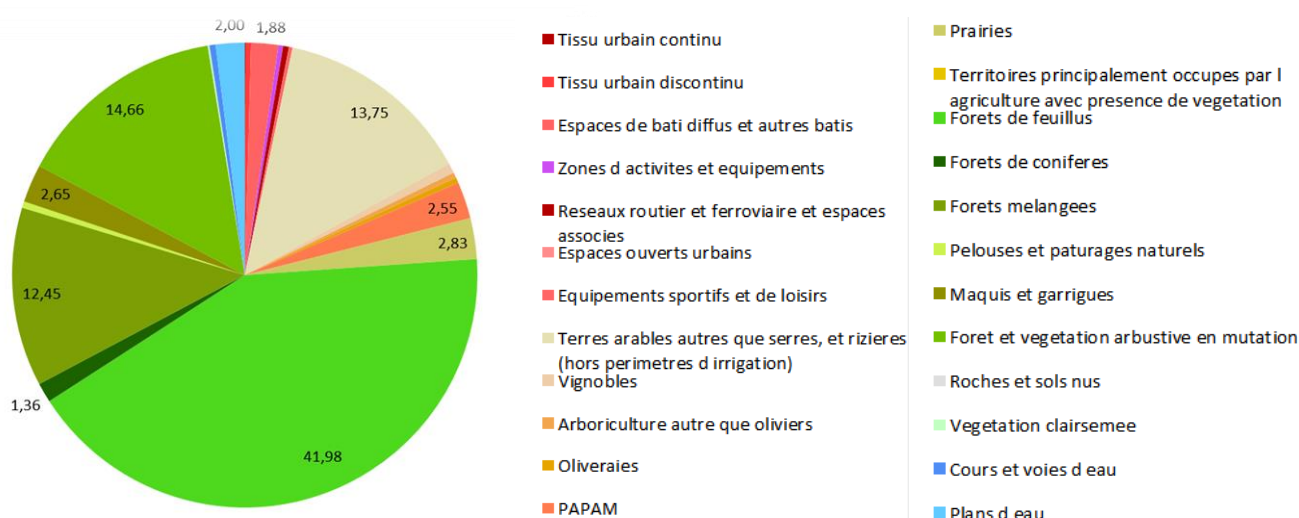


Figure 2: Répartition de l'occupation du sol sur le bassin versant de l'Esparron (Source: CRIGE, 2014)

2.6 Les usages et enjeux économiques et sociaux

Trois types d'usages se sont développés autour de la retenue d'Esparron et plus généralement sur l'ensemble du site du bas Verdon.

- Usage énergétique

Les trois retenues d'eau formées par les barrages de Saint Croix, Quinson, et Esparron sont exploitées par EDF pour la production d'hydro-électricité. Les trois retenues produisent plus de 312 millions de kWh par an soit 55% de la consommation en électricité d'une ville de 100 000 habitants. Cette production contribue à la sécurisation de l'alimentation en électricité de la région. Elle constitue une ressource rapidement mobilisable pour faire face à des événements climatiques particuliers, aux pointes de consommation (journalières ou saisonnières) ou encore à des événements techniques rendant indisponibles d'autres sources de production énergétique.

- Usage de prélèvement d'eau et irrigation

Les retenues d'eau du Verdon constituent également une ressource importante pour les prélèvements et l'irrigation. La Société du Canal de Provence (SCP) possède un droit d'eau de 660 millions de m³ par an et dispose d'une réserve de 225 millions de m³ dans les retenues formées par les barrages qui jalonnent le Verdon. Elles alimentent ainsi en eau, partiellement ou totalement, plus d'une centaine de communes et des grandes villes dont Aix-en-Provence, Marseille ou Toulon, ce qui représente environ 2 millions d'habitants.

Indépendamment du Canal de Provence, certaines collectivités riveraines s'alimentent directement dans le Verdon ou dans sa nappe.

Ces prélèvements sont utilisés pour l'agriculture et permettent l'irrigation de plus de 55 000 ha de surface agricole utile.

Ces prélèvements sont nombreux mais peu importants en quantité d'eau prélevée. La consommation augmente par contre en période de pointe touristique (été sur l'ensemble du territoire).

- Usages touristiques

La mise en eau des lacs de retenue et leur valorisation a contribué à l'attractivité des sites des lacs du Verdon. Ils offrent un cadre exceptionnel pour les activités touristiques et de loisir de la région.

De nombreuses activités touristiques liées à la présence de l'eau s'y sont développées comme la baignade, la pêche et les activités nautiques (voile, kayak, canoë, pédalo...).

Les sites autour des lacs ont ainsi vu le développement d'infrastructures d'accueils tels que les campings et hôtels.

Chaque année, durant les périodes estivales, près de 40 000 vacanciers fréquentent le bassin versant du Verdon.

Dans le contexte du changement climatique, des questions se posent sur l'évolution de cette ressource, alors que les besoins ne cessent d'augmenter.

2.7 Le cadre réglementaire

Le cadre réglementaire qui régit la politique de la gestion de l'eau en France s'appuie sur de nombreux documents qui définissent les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau.

- La Directive Cadre sur l'Eau

La directive 2000/60/CE du Parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Elle fixe des objectifs pour la préservation et la restauration de l'état des masses d'eau superficielles et souterraines. L'objectif général est d'atteindre le bon état écologique des différents milieux à l'échéance de 2021 avec une possibilité de dérogation en 2027.

Le bon état des cours d'eau doit être atteint sur deux états : chimique et écologique. L'objectif de bon état chimique consiste à respecter des seuils de concentration liés aux normes de qualité environnementales. Celui de bon état écologique est fixé par des indicateurs biologiques et physico-chimiques soutenant la biologie.

La retenue de l'Esparron correspond à la masse d'eau fortement modifiée « plan d'eau de l'Esparron » et porte le code masse d'eau « FRDL89 » (Tableau 2).

Tableau 2 : Masse d'eau et objectifs de bon état sur la zone d'étude (Source : SDAGE Rhône Méditerranée Corse 2016-2021)

Numéro	Nom de la masse d'eau	Etat de la masse d'eau			
		Etat écologique	Niveau de confiance	Etat chimique	Niveau de confiance
FRDL89	lac d'esparron	Bon état	Fort	Bon état	Faible

Il s'agit d'une masse d'eau en bon état dont l'objectif en termes de gestion est de conserver ce bon état et valoriser la ressource.

- Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Rhône-Méditerranée

Le SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée 2016-2021 a été adopté en comité de bassin le 20 novembre 2015 et approuvé par le Préfet coordinateur de bassin le 3 décembre 2015. Il décrit les priorités de la politique de l'eau pour le bassin hydrographique Rhône-Méditerranée.

Le SDAGE a une portée juridique, puisque les programmes et décisions administratives dans le domaine de l'eau (autorisations, déclarations, schémas départementaux des carrières...) et les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) doivent être compatibles ou rendus compatibles avec les dispositions du SDAGE. Les documents d'urbanisme (schémas de cohérence territoriale, plans locaux d'urbanisme, cartes communales...) doivent être compatibles avec ses orientations fondamentales et ses objectifs.

- Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Verdon

Le Schéma d'Aménagement et de gestion des eaux (SAGE) est un document de planification de la gestion de l'eau à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente : le bassin versant. La structure porteuse de l'élaboration et de la mise en œuvre du SAGE Verdon est le Parc Naturel Régional du Verdon. Il a été approuvé par la CLE le 12 février 2014 et approuvé par arrêté interpréfectoral le 13 octobre 2014. Il fixe des objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur, de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau pour le bassin versant du Verdon. Ceux-ci sont développés dans le document à travers 5 grandes orientations stratégiques.

Le présent projet répond aux objectifs suivants :

- Assurer une qualité des eaux qui permet la satisfaction des différents usages et préservant les potentialités biologiques ;
- Concilier les activités touristiques liées à l'eau avec les autres usages et la préservation des milieux.

- Le contrat de rivière Verdon 2

Le Contrat de rivière Verdon est un contrat moral, technique et financier entre acteurs locaux (communes, intercommunalités, associations, entreprises etc.) et financeurs (Agence de l'Eau, Région, départements, Etat) visant à mener des actions concrètes à partir d'objectifs partagés. Il s'agit d'un programme d'actions, portées par différents acteurs, sur lesquelles les financeurs s'engagent. Il est piloté par le comité de rivière, regroupant l'ensemble des acteurs et animée par le Parc. Ce partenariat entre les différents acteurs du territoire dans la gestion intégrée du bassin versant, est mis en œuvre à travers 159 actions détaillées en 245 opérations qui se réfèrent aux 5 objectifs principaux détaillés dans le SAGE Verdon.

C'est dans cette perspective, en collaboration avec la Société du Canal de Provence et dans un objectif de solidarité amont-aval, que la présente étude s'insère. Elle répond à une action du Contrat de rivière Verdon 2 mis en place par le Parc Naturel Régional du Verdon.

2.8 Méthodologie générale de l'étude

2.8.1 Choix et fréquence des stations d'échantillonnage

Les relevés de terrain ont été réalisés sur une période de un an à raison d'une campagne d'échantillonnage par mois, entre **janvier 2016 et janvier 2017**. Les mois de mars et décembre 2016 n'ont pas pu être échantillonnés. C'est la raison pour laquelle la mesure de janvier 2017 a été ajoutée pour compléter la campagne de prélèvement.

Sept points d'échantillonnage ont été répartis de façon à prendre en compte la variabilité spatiale des apports (Figure 3):

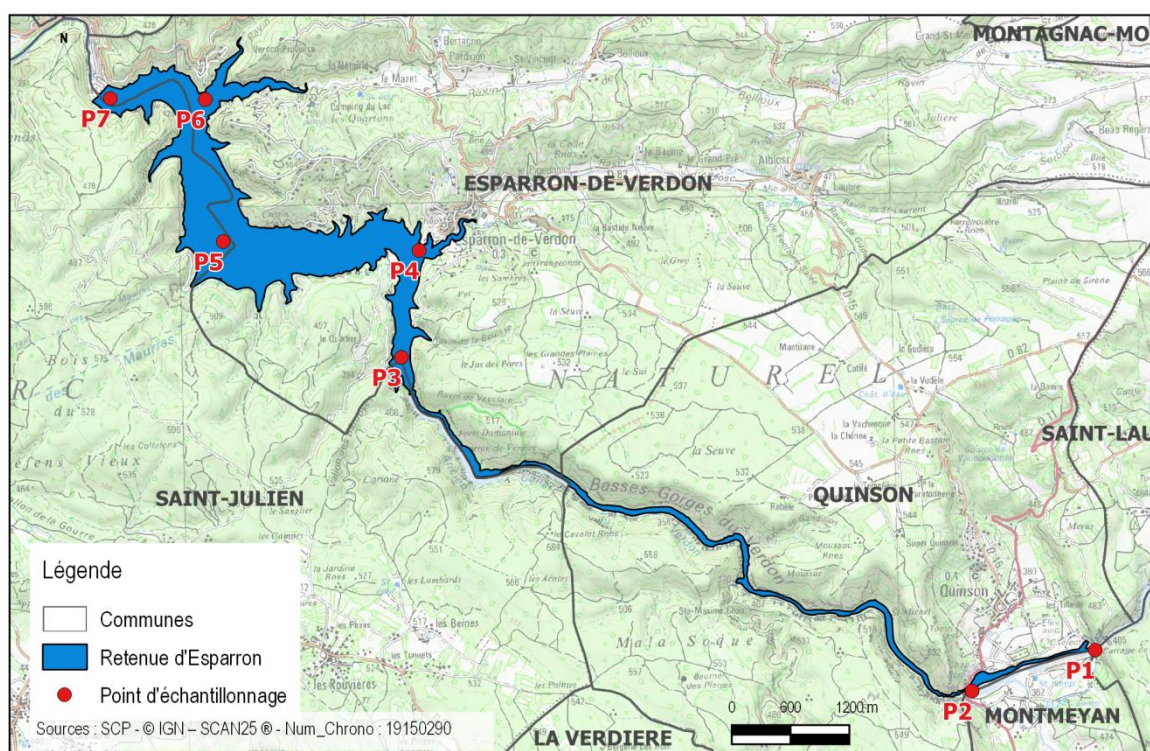


Figure 3: Emplacement des points d'échantillonnage sur la retenue d'Esparron (Carte réalisée avec le logiciel Qgis)

- **La station P1** représente le point d'échantillonnage le plus en amont de la retenue, situé à proximité du barrage de Quinson. Il est représentatif des eaux entrant dans la retenue d'Esparron. A ce point la profondeur maximale est de 2 m.
- **La station P2** est située en amont du pont de Quinson, à l'entrée des gorges. Ce point d'échantillonnage est représentatif des apports des stations d'épuration (STEP) situées en amont (station de Quinson, et trois autres STEP sur le ruisseau Beau Rivé). La profondeur maximale d'échantillonnage à ce point est de 10 m.
- **La station P3** est située juste à la sortie des gorges, elle est représentative des cycles biogéochimiques ayant lieu dans le tronçon des gorges, pouvant avoir un fonctionnement hydrologique différent de par la morphologie de la retenue très encaissée. La profondeur maximale échantillonnée se trouve à 30 m.

- **La station P4** est échantillonnée depuis un ponton de la commune d'Esparron-de-Verdon, dans l'anse du ravin d'Albiosc, sur lequel sont situées d'autres sources ponctuelles de nutriments. En ce point, la profondeur maximale échantillonnée est de 15 m.
- **La station P5** se trouve au centre de la retenue d'Esparron. La profondeur maximale échantillonnée est située à 35 m.
- **La station P6** est située à la jonction des anses du ravin de Trente et du ravin de Bellieux. La profondeur maximale échantillonnée est de 35m.
- **La station P7** est localisée à proximité du barrage de Gréoux, au point le plus profond de la retenue qui correspond également au point d'échantillonnage du réseau de l'Agence de l'Eau. En ce point, la profondeur maximale d'échantillonnage est de 45 m.

Les dates d'échantillonnage ont été calées autant que possible avec les dates de passage des satellites Landsat 8 (et/ou Sentinel 2) au-dessus du secteur du Verdon. Le but est de mutualiser les données de qualité d'eau avec le pôle AFB (Agence Française pour la Biodiversité)/Irstea qui utilise la donnée de réflectance satellitaire comme proxy de la chlorophylle. La réalisation des campagnes aux dates de prise de vue par satellite permettra à terme la calibration des images par le Pôle. Cette calibration ne fait pas partie de la présente étude, elle est réalisée par le Pôle dans le cadre du projet TELQUEL financé par l'AFB et le CNES.

2.8.2 Mesures réalisées

Les paramètres et les opérations d'échantillonnage qui ont été réalisées en amont de ce stage entre janvier 2016 et janvier 2017, sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau 3) :

Tableau 3: Récapitulatif des opérations de prélèvement

Analyses	Paramètres	Méthode d'analyse/Normes	Type de prélèvement / Mesures
Mesure in situ	O2 dissous (mg/l, %) ; pH ; conductivité, (25°C) ; T°C (eau et air) ; disque Secchi, turbidité ;	Mesures In Situ	Profils verticaux tous les 1 m (si hauteur d'eau suffisante)
Physico-chimie	pH ;	NF EN ISO 10523	1 prélèvement intégré sur la colonne d'eau (Si présence d'une thermocline, 3 prélèvements : sub-surface, épilimnion, hypolimnion)
	Turbidité ;	NF EN ISO 7027	
	Ammonium ;	NF ISO 15923-1	
	Nitrites, nitrates, ortho-phosphates ;	NF EN ISO 10304-1	
	NTK ;	NF EN 25663	
	P-TOT ; silice dissoute ;	Méthode interne	
	COT ;	NF EN 1484	
	Chlorophylle a ; Phéopigments	NF T 90-117	

Dans le cadre du présent rapport, sont détaillés 4 de ces paramètres : l'azote, le phosphore, la transparence et la chlorophylle-a.

2.8.3 Détermination du bassin versant à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)

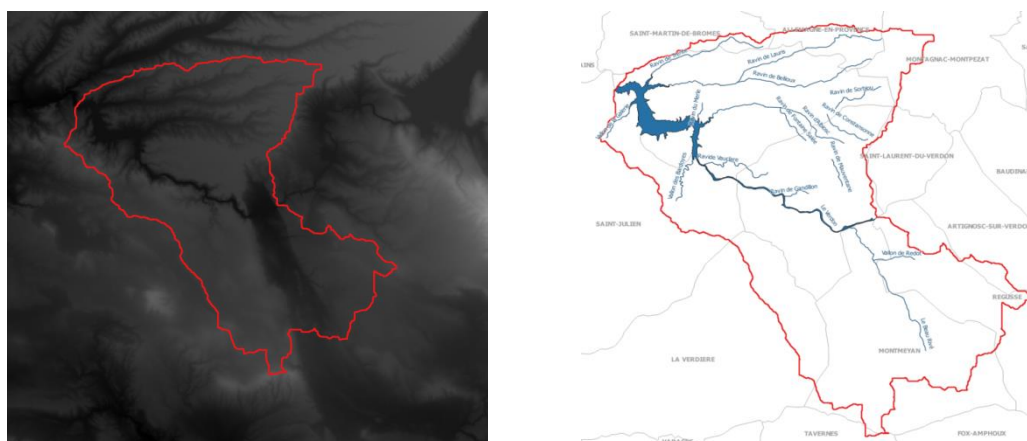


Figure 4: Illustration de découpage du bassin versant de la retenue d'Esparron grâce à un modèle numérique de terrain (réalisé avec le logiciel QGIS)

Afin d'évaluer les apports directs du système, le **bassin versant direct** de la retenue d'Esparron a été déterminé à l'aide d'un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** réalisé avec le logiciel QGIS (Figure 4). Un MNT est une représentation topographique d'une zone, créé à partir de données d'altitude du terrain. Chaque goutte d'eau qui entre dans cette délimitation s'écoulera vers le lac.

2.8.4 Le bilan hydrique

Pour établir le bilan en nutriment de la retenue d'Esparron, et quantifier de manière cohérente les flux entrants et sortants de la retenue, un bilan hydrique a été au préalable réalisé (Figure 5). Il a permis dans un premier temps d'identifier les différents réservoirs qui composent le système de la retenue, puis évaluer l'incertitude liée à chaque composante du bilan hydrique (schématisées sous forme de compartiments) due aux approximations et hypothèses formulées sur le fonctionnement du réseau hydrique.

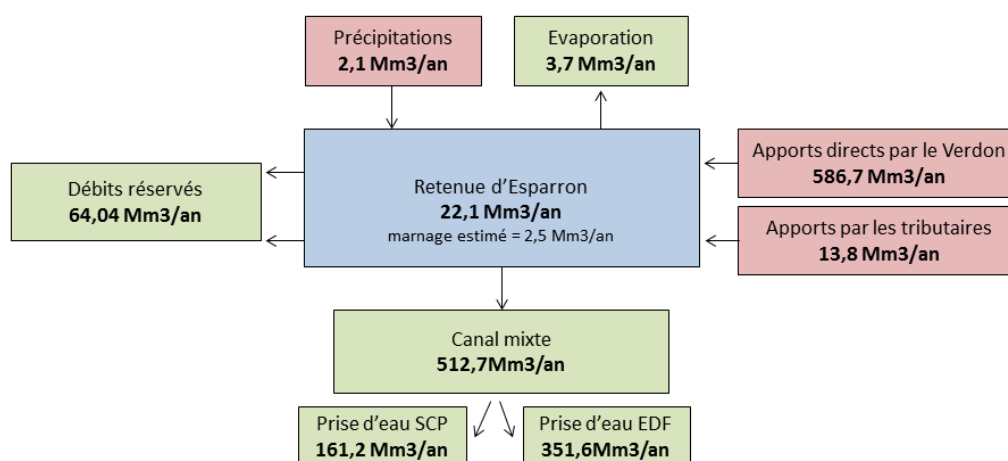


Figure 5: Bilan hydrique de la retenue d'Esparron (en Mm³/an)

Le contexte karstique rend l'estimation des pertes difficile. Il a été estimé, (PNRV, 2005), une perte d'eau par infiltration karstique entre 9,5 et 15,6 Mm³ en tête de bassin. En estimant les pertes karstiques du même ordre de grandeur, on peut évaluer le bilan hydrique à l'équilibre, c'est-à-dire considérer le surplus de 22,1 Mm³/an comme des pertes par infiltration.

3 BILAN DES APPORTS DE LA RETENUE D'ESPARRON

Le bilan des apports dressé dans la présente étude s'intéresse particulièrement aux apports en **azote** et **phosphore**. Ces nutriments sont nécessaires au développement de la végétation aquatique dans certaines proportions. Un excès de l'un ou l'autre de ces nutriments peut amener à une dégradation de la qualité de l'eau et à un éventuel développement excessif de plantes aquatiques. Plusieurs usages de l'eau peuvent alors être restreints.

Le phosphore et l'azote que l'on retrouve dans un lac peuvent provenir de plusieurs sources naturelles ou d'origine humaine (Annexe 3). Les apports en azote sont principalement associés aux apports diffus et aux usages du bassin versant (activités agricoles principalement). Le phosphore est issu principalement des eaux usées et des rejets des STEP.

Une surveillance et un bilan de ces deux principaux nutriments paraît judicieux pour analyser l'état de la retenue d'Esparron.

Pour établir le bilan des nutriments et apports de la retenue d'Esparron, les différents compartiments d'entrée, de sortie et de stockage qui composent le système de la retenue d'eau sont identifiés et font l'objet d'une analyse détaillée. (Figure 6).

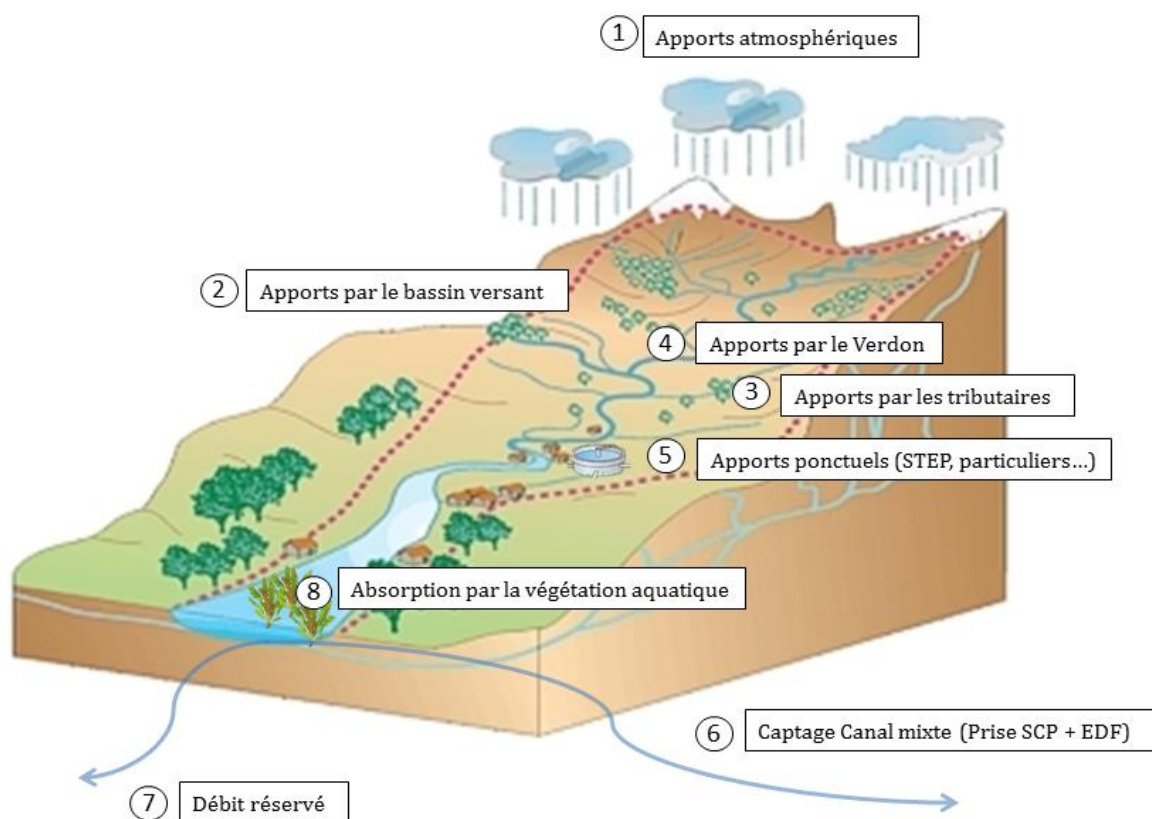


Figure 6: Identification des différents compartiments du système hydrologique de la retenue d'Esparron

Pour chacun des 8 compartiments répertoriés, les méthodes d'analyse et de recherche appliquées sont synthétisées dans le tableau suivant (Tableau 4).

Pour faciliter la lecture et la compréhension de la mise en place de ce bilan, les méthodes et les résultats seront expliqués dans un même paragraphe pour chacun des compartiments.

Tableau 4: Sources et méthodes d'analyse utilisées pour établir le bilan de la retenue d'Esparron

N° schéma		Sources	Méthode
Entrées			
1- Apport atmosphériques		Bibliographie (Mignon et coll., 1989)	5 kgN/ha/an * Surface du plan d'eau 0,15 kgP/ha/an * Surface du plan d'eau
2- Apports par le bassin versant		Traitement SIG + Bibliographie (Worrall and Burt, 1999, Benetton, 1984)	Coefficient d'exportation de chaque nutriment * Surface par type d'occupation du sol
4- Apports par les tributaires		Cartographie des débits caractéristiques de référence sous SIG (IRSTEA) + Concentrations mesures SCP 2016	Débit théorique des tributaires * Concentration en nutriment au point échantillonné le plus proche
3- Apports par le Verdon		Données de turbinage EDF + Concentrations mesures SCP 2016	Débit turbiné entrant à la centrale hydroélectrique de Quinson* Concentration en nutriment en P1
5- Apports ponctuels		Données DLVA, Insee, PNRV et communes concernées	(nombre d'habitant permanent*5 kgN/pers/an ou 0,5 kgP/pers/an(nutriments produit en sorti de STEP) + nombre d'habitants estival*(1/4*5 kgN/pers/an ou 0,5 kgP/pers/an (nutriments produit en sortie de STEP))+ nombre d'habitants non raccordés*(1/4*6,5kgN/pers/an ou 0,75 kgP/pers/an(nutriments produit après traitement autonome (en kg/personne/an))
Sorties			
7- Captage par le canal mixte	Prise d'eau SCP	Débits SCP + Concentrations mesures SCP 2016	Débit Canal SCP (débit turbiné à Boutre) * Concentration en nutriments en P5
	Prise d'eau EDF	Données de turbinage EDF + Concentrations mesures SCP 2016	Débit Canal EDF (débit turbiné à Vinon) * Concentration en nutriments en P5
8- Débit réservé		Données de turbinage EDF + Concentrations mesures SCP 2016	Débit réservé * Concentration en nutriments en P7
Stockage			
6- Absorption par la végétation aquatique		Bibliographie (de Desmet et al., 2011) + Données étude SCP cartographie des herbiers 2008	(1,6 kgN/ha/an * surface herbiers) (0,2 kgP/ha/an * surface des herbiers) Calculé sur 7 mois (période de croissance végétative entre avril et octobre
Sédiments		Considééré à l'équilibre dans le cadre de l'étude	

Le compartiment représentant les sédiments n'a pas été inclus dans cette étude et n'a pas fait l'objet de prélèvements pendant la campagne de mesure. Cela s'explique par la difficulté à mettre en place un prélèvement de sédiment en particulier à certaines profondeurs de la retenue et des moyens que cela nécessite. La séquestration d'azote ou phosphore n'a pas pu être authentifiée. La seule perte au niveau benthique dans notre bilan se fait par fixation dans les herbiers en zone littorale.

3.1 Apports atmosphériques

Les apports atmosphériques en azote et phosphore peuvent constituer une part importante des apports totaux.

En effet, les précipitations contiennent de l'azote et du phosphore sous forme dissoute ou sous forme particulaire, associés à des particules en suspension dans l'air. Les apports sont égaux à la concentration des eaux de pluie en phosphore et en azote total, multiplié par le volume annuel qui atteint la surface de la retenue.

Comme les précipitations, les teneurs des eaux de pluie en azote et en phosphore varient d'une localité à l'autre. En effet, la pollution de l'air par industrialisation ou urbanisation augmente les concentrations des précipitations en azote et phosphore.

De plus, dans les zones forestières, les lacs reçoivent l'essentiel des apports en nutriments des précipitations, contrairement aux lacs entourés par des zones herbeuses ou incultes.

- **Méthodes**

Les apports atmosphériques directs sur le plan d'eau peuvent être estimés d'après les mesures réalisées dans la région la plus proche du site étudié (Villefranche-sur-mer), dans une fourchette de 5 à 10 kg/ha/a d'azote et de 0,15 à 0,30 kg/ha/a de phosphore (Mignon et coll., 1989).

Des données complémentaires sur les apports atmosphériques en Méditerranée (Loye-Pilot et coll. 1990) conduisent à retenir les valeurs minimums de ces fourchettes pour notre région peu industrialisée et où l'agriculture est peu intensive (CEMAGREF, 1991).

- **Résultats**

Les zones industrielles dans la région sont très peu nombreuses, par conséquent, les apports atmosphériques sont faibles. Ils représentent 1 514 kg d'azote par an et 45 kg de phosphore par an .

3.2 Apports par le bassin versant

L'occupation des terres du bassin versant d'un lac exerce une influence considérable sur la production primaire et donc sur le statut trophique (J. Capblancq, 2002).

- **Méthodes**

La méthode de quantification des **apports de nutriments par le bassin versant** consiste à estimer les masses de nutriment produites et le potentiel d'exportation spécifique de chaque nutriment en fonction du type d'occupation du sol. Celui-ci est exprimé en kg/ha/an.

Ce concept est apparu dans les années 1970, quand l'eutrophisation des lacs a été liée à la charge en nutriment en fonction de l'occupation du sol du bassin versant (Vollenweider, 1968).

Les coefficients appliqués à chaque nutriment sont trouvés dans la littérature (Worrall and Burt, 1999, Benneton, 1984). Ils servent à calculer la production de nutriment pour une année moyenne par type d'usage du sol (Annexe 4).

L'approche par estimation de la masse de nutriment produite et de leur potentiel d'exportation spécifique en fonction du type d'occupation du sol comporte toutefois des limites.

La sélection à partir de données bibliographiques pour un site d'étude donné est largement subjective (Reckhow et al., 1980). En effet le coefficient appliqué dépend de nombreux facteurs, tels

que les conditions hydrologiques, les conditions climatiques, la topographie, le type de sol, la gestion du bassin versant, qui sont spécifiques à chaque terrain d'étude.

L'utilisation d'une bibliographie traitant d'un territoire d'étude localisée dans une même hydro-écorégion permet de limiter l'incertitude liée au choix subjectif des données bibliographiques.

Les apports en nutriments associés aux petits tributaires de la retenue (tous hors Verdon) sont pris en compte dans les apports par le bassin versant, et ne figurent pas explicitement dans le bilan, afin d'éviter un double comptage.

En effet, la **contribution en termes de débit des tributaires** à la retenue d'Esparron a été estimée grâce à l'outil de cartographie des débits caractéristiques de référence mis en place par l'IRSTEA. Elle s'appuie sur une méthodologie nationale recourant à plusieurs modèles et reflète l'état des connaissances fin 2012.

Cependant, ce modèle étant peu fiable dans un contexte karstique, on fait l'hypothèse que les apports par les tributaires sont inclus dans les apports généraux par le bassin versant. Les tableaux de calcul des apports par les tributaires seront présentés en annexe.

• Résultats

Les apports en nutriment de la retenue d'Esparron par le bassin versant sont estimés à **35 114 kg d'azote total** et **4 850 kg de phosphore par an** (Annexe 5).

En ce qui concerne l'azote, les exploitations agricoles représentent l'usage de sol qui produit le plus d'azote sur le territoire d'étude avec environ 26 860 kg d'azote/an ce qui représente 77% de la production total du bassin versant (Figure 7). Bien que le territoire d'étude soit très peu urbanisé, les zones artificielles représentent une production de 4 629 kg d'azote/an soit 13% des apports par le bassin versant.

Pour le phosphore, les exploitations agricoles représentent l'usage du sol qui produit le plus de phosphore avec environ 2 685 kg de phosphore/an, ce qui représente 55% de la production totale de l'ensemble du territoire d'étude. Les zones naturelles et les zones artificielles présentent une production plus ou moins équivalente avec respectivement 21 et 19% de la production totale du bassin versant

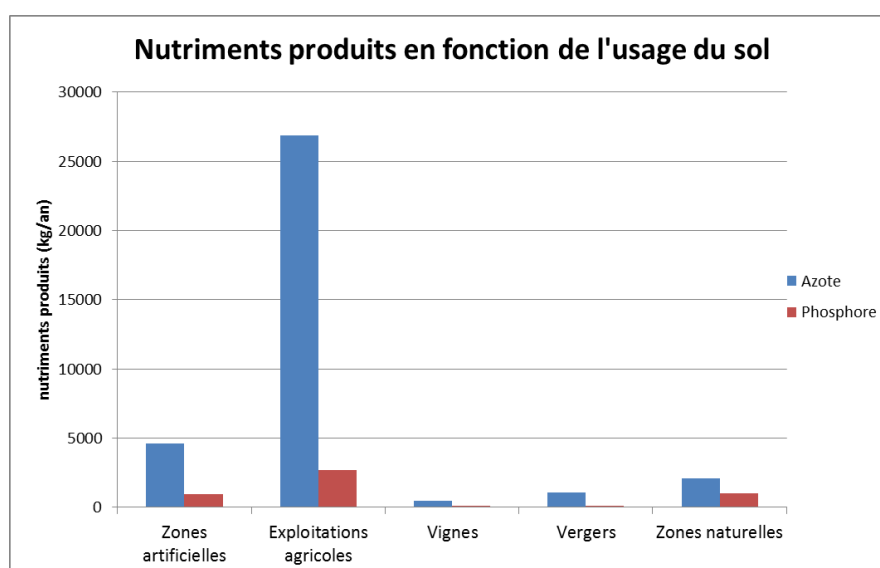


Figure 7 : Apports en azote et phosphore issus de l'usage du sol

3.3 Apports par le Verdon

Le Verdon est le principal affluent de la retenue d'Esparron et constitue ainsi sa principale source.

- **Méthode**

Les charges en nutriments apportées par le Verdon sont estimées en multipliant les débits turbinés depuis le barrage de Quinson (données fournies par EDF) avec les concentrations en nutriments au point de prélèvement P1 (Annexe 6). De cette manière on obtient un flux de nutriments pour la période d'étude considérée (en kg/an). Lorsque la concentration se situe en dessous de la limite de quantification, la valeur de la concentration prise en compte est celle de la limite de quantification de ce paramètre divisée par deux.

- **Résultat**

Les apports sont estimés à 190 620 kg d'azote par an et 12 272 kg de phosphore par an .

3.4 Evaluation des apports ponctuels

On entend par « apports ponctuels » les rejets vers le milieu aquatique à partir des stations d'épuration, industries ou habitations particulières (non connectés à un système d'assainissement). Le phosphore provient essentiellement de l'utilisation des détergents, alors que l'azote provient des excréments. La charge en azote et en phosphore dans les rejets ponctuels est fonction de la densité des populations des villages riverains et du type de traitement que subissent ces rejets avant de déboucher dans la retenue.

- **Méthode**

Les charges en nutriments qui intègrent la retenue d'Esparron par les apports ponctuels sont évaluées dans ce rapport selon deux critères :

- Le mode de traitement de la STEP ;
- La capacité de traitement (pour éventuellement évaluer l'impact des surcharges des stations en période estivale).

Cela permet d'estimer leur niveau de fonctionnement et d'impact sur le milieu récepteur.

Le système d'assainissement collectif comprend tous les ensembles de réseaux de collecte et systèmes de traitement, collectant une charge supérieure à 10 EH, qu'ils soient publics ou privés.

On distingue :

- Les systèmes d'assainissement domestiques ;
- Les systèmes d'assainissement des campings et centres de loisirs.

Dans un premier temps, la capacité de traitement (en EH) totale du bassin versant direct de la retenue est déterminée par enquête (DLVA, PNRV, communes) et recherche bibliographique (Assainissement.gouv). La charge en nutriment issus des traitements des STEP, ainsi que les rejets issus de la population non raccordée, est estimée par des données trouvées dans la bibliographie. Schaffner et Oglesby (1978) estiment que la charge en phosphore des égouts municipaux est de 1,5 kg par personne et par an et que les traitements primaires, secondaire et tertiaires éliminent respectivement 10, 20 et 90% de cette charge, alors que pour les populations non raccordées à un égout l'élimination n'est que de 50%, soit l'équivalent de 0.75kg/personne/an.

Selon Vollenweider (1971), les apports des eaux usées sont de 5 kg d'azote/personnes/an et de 0,5 kg de phosphore/personne/an pour les effluents traités. Ils sont de 0,8 kg/personne/an et 1,1 kg d'azote/personne/an pour les effluents non traités recevant des effluents industriels.

En ce qui concerne l'assainissement autonome, la situation réelle peut être potentiellement sous-estimée en raison de la dispersion de l'habitat, de la connaissance insuffisante de certains réseaux et de l'évolution permanente de ces données. Cette étude permet de donner une estimation des rejets issus de l'assainissement autonome.

Dans un deuxième temps, une étude de la variation de la population à l'échelle annuelle sur le bassin versant, grâce à des données Insee 2017 et des études réalisées par la DLVA, permet d'estimer la quantité de rejet issus des STEP en fonction de la population permanente et estivale raccordées ou non au réseau communal.

La population permanente correspond à la population résidant à l'année. La population saisonnière est estimée par la capacité d'hébergement touristique (hôtels, maisons et appartements de vacances, hébergement touristiques, campings). L'analyse de la population présente sur le bassin versant permet d'estimer l'impact anthropique lié à la densité de population et aux activités qui y sont liées. En effet, la population estivale peut doubler sur certaines communes par rapport à la population permanente.

Ainsi les apports par les rejets ponctuels ont été estimés en ajoutant :

- Ce que produit la **population permanente** (nombre d'habitant*nutriments produit en kg/personne/an (données issues de la bibliographie citée ci-dessus)) ;
- Ce que produit **population estivale** (nombre d'habitant*nutriments produit en kg/personne/an sur 4 mois (données issues de la bibliographie citée ci-dessus));
- Ce que produit la **population non raccordée** (le plus souvent faisant partie de la population estivale (maisons secondaires...)).

• **Résultat**

- Recensement des systèmes d'assainissement du bassin versant

Le nord du bassin versant du lac d'Esparron est constitué par les communes d'Esparron, Quinson, Montpezat et Allemagne-en-Provence.

Seuls les villages d'Esparron-sur-Verdon et Quinson sont situés sur le bassin versant propre du lac d'Esparron. Les autres communes ne possèdent sur le bassin versant que du terrain (en général cultivé) et deux ou trois habitations chacune. Les ouvrages proprement dit et leurs ouvrages d'épuration sont tous à l'extérieur du bassin versant. Dans le secteur sud se trouvent une petite partie de Saint-Julien et une partie du territoire de Montmeyan.

Sur le bassin versant du site d'étude, plusieurs stations d'épuration sont présentes (Annexe 7). Au total on dénombre 10 systèmes (Annexe 8) dont la capacité nominale de traitement issue des STEP est de **8 876 EH**.

- Population présente sur le bassin versant

La population permanente et estivale sur le bassin versant de la retenue d'Esparron est répartie de la manière suivante (Annexe 9).

Selon les données de l'Insee 2017, la population sur l'ensemble des 3 principales communes du secteur d'étude de la retenue d'Esparron est de **1 616 habitants permanents**.

Le potentiel touristique du site offre une capacité d'accueil en période touristique (entre juin et septembre) de l'ordre de **5 120 habitants supplémentaires**, soit une augmentation de la population d'un facteur 3,2. (Source : Atlas de l'hébergement touristiques des Alpes-de-Haute-Provence, Agence de développement touristique Alpes de Hautes-Provence, 2008).

- Estimation des rejets issus de l'assainissement

Les apports en nutriment de la retenue d'Esparron par les systèmes d'assainissement sont estimés à **14 894 kg d'azote total par an et 1 517 kg de phosphore par an** (Annexe 10).

La population estivale contribue à environ 46% des rejets totaux de nutriments sur la période de juin à septembre. Le dimensionnement des STEP est bien estimé car même en période d'accroissement de la population pendant la période estivale, la capacité de traitement de l'ensemble des stations surpasse la population présente sur le territoire d'étude.

3.5 Les pertes par le canal mixte

La prise d'eau du canal mixte est située en rive gauche de la retenue d'Esparron sur la commune d'Esparron-de-Verdon.

Le canal mixte se scinde en deux parties au niveau de Boutre, l'une devient le canal EDF qui passe par la centrale hydroélectrique de Vinon et envoie l'eau dans le canal usinier d'EDF en Durance, l'autre le Canal de Provence qui prend en charge le reste des volumes vers les territoires plus au sud.

- Méthode

Le flux de nutriments qui sort du système par le canal mixte est évalué en multipliant les débits turbinés par l'usine hydroélectrique de Vinon (données fournies par EDF), et les données de débits de Boutre (données fournies par la Société du Canal de Provence) avec les concentrations en nutriments au point de prélèvement P5, qui se rapproche le plus de la sortie du Canal mixte (Annexe 11)

- Résultats

Les sorties par le canal mixte sont estimés à **157 006 kg d'azote par an et 10 175 kg de phosphore par an**.

3.6 Les pertes par le débit réservé

Le débit réservé est le débit minimal à maintenir en permanence dans un cours d'eau au droit d'un ouvrage pour garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans ces eaux.

Le débit réservé a pour objectif de préserver les milieux aquatiques et d'assurer une répartition équilibrée de l'eau entre les usages amont et aval.

- Méthode

La charge en nutriment sortant du système par le compartiment « débit réservé » est évaluée en multipliant les valeurs des débits réservés (données fournies par EDF) aux concentrations en nutriments au point de prélèvement P7, le plus aval de la retenue, situé à proximité du barrage de Gréoux.

- **Résultats**

Le débit réservé en aval du barrage de Gréoux est de **2,2 m³/s**. Il correspond à un débit supérieur à la valeur minimal règlementaire qui est de 1 m³/s.

Ainsi, les pertes par ce réservoir sont estimées à **33 908 kg d'azote par an** et de **1 737 kg de phosphore par an**.

3.7 Estimation de l'absorption par la végétation aquatique

Les végétaux aquatiques (phytoplancton, algues benthiques et macrophytes) absorbent les nutriments disponibles dans la retenue afin d'accroître leur biomasse. Ils participent ainsi au cycle des nutriments, en particulier ceux du carbone, de l'azote et du phosphore dans la colonne d'eau (Madsen and Cedergreen, 2002; Clarke 2002)

Plusieurs études ont montré l'impact de la croissance de la végétation aquatique sur la qualité de l'eau dans les lacs et retenues d'eau (Yan et al., 1998; Rommens et al., 2003; Lee and McNaughton, 2004) et la capacité des macrophytes à accumuler des pourcentages substantiels des nutriments disponibles dans la colonne d'eau (Ozimek et al., 1993; Jansson et al., 1994).

Une croissance modérée permet d'atteindre un équilibre entre la quantité de nutriments apportés à la retenue, et ce qui peut être stocké dans les plantes.

Un apport trop important en nutriments peut saturer le système, causant non seulement une prolifération excessive de plantes, mais aussi peut faire basculer le système dans un état d'eutrophisation voire anoxie.

Il s'agit ici d'estimer le flux de nutriment absorbé par la végétation aquatique au sein de la retenue d'Esparron.

- **Méthode**

La démarche s'appuie sur la cartographie produite lors de l'étude concernant la réhabilitation des plans d'eau du Verdon envahis par la végétation aquatique – Mise au point de techniques adaptées de maîtrise des herbiers – Deuxième tranche, réalisée par la Société du Canal de Provence en 2010.

Les relevés se sont déroulés entre octobre 2007 et février 2008. La cartographie des herbiers de la retenue fait donc état de la situation pour la période mentionnée ci-dessus.

L'analyse de la répartition spatiale de la végétation aquatique (Annexe 12, 13 et 14) a permis de quantifier la surface occupée par chaque espèce au sein de la retenue d'Esparron.

Selon l'étude de Desmet et al., 2011, l'estimation des flux d'azote inorganique dissous et de phosphore entre la colonne d'eau et la végétation aquatique, équivaut à 1,6 kg N/ha/an et 0,2 kg P/ha/an au printemps et en été. Ainsi le flux de nutriments a été calculé sur la période végétative qui s'étend d'avril à octobre (7 mois).

- **Résultats**

A partir de la cartographie SCP, les surfaces des 3 espèces dominantes ont été calculées : 33,36 ha sont occupés par les herbiers, selon la répartition des espèces décrite dans le Tableau 5 :

Le flux de nutriments absorbés par la végétation aquatique est estimé à **11 209 kg d'azote** et **1 401 kg de phosphore par an**.

3.8 Bilan des charges et conclusions

La figure suivante dresse un bilan des charges d'azote et de phosphore estimées, importées et exportées au lac par les différents compartiments qui composent le système de la retenue :
Le bilan permet de conclure à un **enrichissement** de la retenue en azote et phosphore à hauteur de **46,6 T N/an** et **5,4 T P/an** (Figure 8).

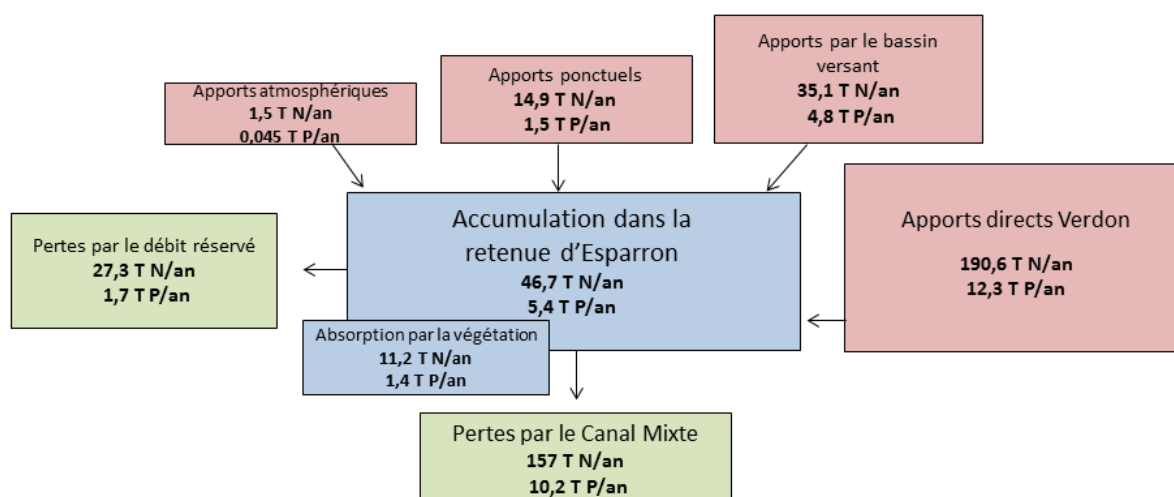


Figure 8: Schéma bilan des apports et pertes de la retenue d'Esparron par an

Les apports par le Verdon constituent la principale source de la retenue d'Esparron, par les débits turbinés au barrage de Quinson, en amont de la retenue. Les apports par le bassin versant, issus de coefficients de production en nutriment en fonction de l'occupation du sol représentent la deuxième source d'apports la plus importante.

Enfin les apports ponctuels sont une source d'apports en nutriments que l'accroissement de population en période estivale et de la population non raccordée influence grandement.

Les apports atmosphériques sont très faibles du fait que le site d'étude se situe dans un territoire très peu industrialisé.

En ce qui concerne la végétation aquatique, celle-ci contribue à l'absorption de nutriments au sein de la retenue de l'ordre de grandeur équivalent aux apports ponctuels.

Une estimation des flux annuels serait plus précise si les mesures étaient effectuées sur des périodes plus courtes, par exemple avec des pas de temps journaliers ou hebdomadaires, cela permettrait de réduire la marge d'incertitude.

4 ANALYSE DE LA VARIABILITE DES ELEMENTS NUTRITIFS

Le but de la partie qui va suivre est d'analyser l'évolution des différents paramètres physiques et chimiques de l'amont à l'aval de la retenue tout au long du cycle annuel de mesure. Cela permettra de comprendre le fonctionnement et la répartition des nutriments au sein de la retenue.

Etudier l'influence des processus naturels et les activités anthropiques sur la retenue permettra *in fine* d'améliorer la gestion du site tout en protégeant et valorisant la ressource en eau.

A la suite de cette analyse, une évaluation critique de la représentativité du point unique de mesure réalisé par l'Agence de l'Eau sera réalisée.

4.1 Limnologie : Fonctionnement général de la retenue d'Esparron

- **Méthode**

Afin d'étudier le fonctionnement général de la retenue d'Esparron, les données issues des mesures et prélèvements de la campagne de terrain ont été analysés : les profils en long, (analyse du paramètre en fonction des stations pour chaque mois échantillonné) (Annexe 15) ont permis d'étudier la variabilité spatiale de la retenue ainsi que la dispersion des nutriments résultant de processus physiques. Les profils par station (analyse du paramètre en fonction des mois pour chaque station échantillonnée) ont permis d'étudier la variabilité temporelle des paramètres au sein de la retenue d'Esparron.

7 paramètres sont analysés pour leur pertinence et leur influence sur les cycles biologiques et physico-chimique de la retenue :

- **La transparence** de l'eau, mesurée par la profondeur de disparition et de réapparition du disque de Secchi. C'est un paramètre important car il permet de déterminer la profondeur de la zone euphotique ($Ze_{ph} = 2.5 \times Z_{secchi}$, profondeur d'eau exposée à une lumière suffisante pour que la photosynthèse se produise) et ainsi le potentiel biogénique de la retenue. En dehors des conditions météorologiques qui peuvent influencer la transparence lors de la mesure, la quantité et la nature des matières et substances présentes dans l'eau (algues, zooplanctons, microorganismes, particules du sol, débris organiques, substances humiques) peuvent avoir une influence sur la transparence de l'eau.

Ce paramètre permet ainsi d'évaluer le niveau trophique de la retenue. Plus un lac vieillit, plus ses eaux sont chargées de particules et la transparence s'en trouve d'autant plus faible.

- **La température**, c'est un paramètre important à prendre en compte dans l'analyse du fonctionnement de la retenue car c'est un processus qui détermine la cyclicité de l'oxygène, des sédiments et des nutriments à l'intérieur du lac. Les données de mesures stratigraphiques sont disponibles pour la période de mai 2016 à janvier 2017.

- **L'oxygène dissous**, La concentration en oxygène dissous est l'une des variables les plus importantes dans les systèmes aquatiques (Van Duin, 1989, D'Autilia, 2004). Elle témoigne de la qualité de l'eau car elle dépend de l'équilibre entre les processus physiques et biologiques au sein d'un lac. La concentration en oxygène dissous est contrôlée par plusieurs processus dont les plus importants sont biologiques : production d'oxygène par photosynthèse et consommation par respiration et demande benthique mais également des processus physiques : aération et advection. Durant la phase éclairée, les organismes possédant des pigments de chlorophylle a produisent de l'oxygène par photosynthèse. L'oxygène est également consommé par le processus de respiration algale et bactérienne. La limite minimale pour la survie de la majorité des espèces de poissons est de 4 mg/l d'oxygène dissous (Légaré, 1998). Les profils verticaux d'oxygène dissous ont été réalisés pour les mois de mai 2016 à janvier 2017. Les premiers mois manquants sont dû à une défaillance de la sonde de mesure.

- **Les éléments nutritifs (nitrate, phosphore total et ammonium)**, l'analyse des concentrations en éléments nutritifs au sein de la retenue et de leurs variations va permettre d'analyser le degré d'eutrophisation de la retenue, d'émettre des hypothèses quant aux diverses sources d'apports et processus qui régissent cette répartition et ainsi envisager des mesures de gestion.
- **La chlorophylle a**, est le pigment principal des organismes photosynthétiques. La concentration de ce pigment dans l'eau est utilisée comme indicateur de la biomasse des algues microscopiques.

- **Résultats**

La transparence (Annexe 15 : Planche 1)

La retenue présente dans l'ensemble une transparence élevée. Les stations situées dans la partie la plus large de la retenue d'Esparron présentent des profils de transparence similaires et significative de par leur profondeur. Le cycle annuel de la transparence de la retenue d'Esparron est marqué par des valeurs plus élevées en hiver (jusqu'à -13 m pour la station P4 en février) et des valeurs plus réduites au printemps et en automne lors du développement saisonnier du phytoplancton avec un minimum pour les mois de juillet, août et septembre (en moyenne - 6 m).

Les relevés du point P5, localisés au centre du lac, peuvent être considérés comme représentatifs de l'évolution à long terme de l'écosystème étant hors de l'influence directe du littoral et des apports des affluents.

Les valeurs mesurées en zones littorales sont plus ou moins soumises à des effets de rive, phénomènes permanents (érosion) ou passagers (apports par les tributaires).

La température (Annexe 15: Planche 2a à 2b)

La retenue d'Esparron présente une stratification thermique saisonnière qui s'apparente au fonctionnement d'un lac monomictique chaud de 2^{ème} ordre d'après la classification de Hutchinson (1957). Elle est caractérisée par deux périodes :

- une **période de stratification estivale**, de mai à septembre, avec une thermocline qui s'installe au mois de mai jusqu'au mois de septembre. Le réchauffement estival touche toute la colonne d'eau et induit un épilimnion d'une épaisseur de 20 mètre en début de période estivale et 5 mètre pour les mois les plus chauds, de juin à septembre. La température maximale de la retenue est observée au mois de juillet avec 24°C en surface et 11 à 12°C au fond. Un gradient amont-aval de la retenue est observé. Les deux points de mesure les plus en amont de la retenue, P1 et P2, situés sur des zones peu profondes, présentent des températures inférieures aux autres points de la retenue. Celles-ci oscillent entre 13 et 16°C pour la période estivale avec l'absence d'une thermocline marquée. Ces fluctuations peuvent s'expliquer par la proximité des stations avec le turbinage du fond du barrage de Quinson.
- une **période de mélange hivernale**, à partir d'octobre, les profils sont homogènes sur toute la colonne d'eau avec des températures de 14-15°C, pour atteindre une température minimale de 7°C en janvier. Les profils restent également homogènes sur l'ensemble des stations avec un léger gradient amont-aval de 1 à 1,5°C

L'oxygène dissous (Annexe 15 : Planche 3a à 3h)

L'eau de la retenue d'Esparron est en général très bien oxygénée avec des teneurs en oxygène dissous des eaux superficielles qui oscillent autour de 100% et affichent parfois une sursaturation en dépassent 110% pour une grande majorité des stations sur la période observée. Une concentration moyenne de 10 mg/l est observée en surface au sein de la retenue

avec un minimum atteint au fond, à partir de 30 mètres, la teneur en oxygène avoisine 2 mg/l. Les conditions anoxiques observées

Des différences saisonnières sont observées sur les profils verticaux de la retenue.

- **La période estivale** (printemps et automne) où l'on observe la plus grande hétérogénéité de concentration avec un pic d'oxygène dissous localisé au niveau de la thermocline, pour les stations P5, P6, P7 situées dans la partie la plus aval et évasée de la retenue. Ce pic de concentration en oxygène dissous au niveau de la thermocline (entre 11 et 13 mg/l) met en évidence une forte activité biologique. La **période de fin d'été** fait apparaître dans un premier temps des pics moins marqués puis une tendance à l'appauvrissement de l'hypolimnions.

- **La période hivernale** entraîne une concentration en oxygène dissous uniforme sur toute la colonne d'eau. Ce phénomène est provoqué par le mélange des eaux de l'ensemble de la colonne d'eau avec très peu de variation des teneurs en oxygène dissous.

Des différences entre les stations sont également observées avec des gradients amonts-aval plus marqué pendant la saison estivale (d'août, septembre et octobre)

Les stations P1, P2 et P3, présentent des profils homogènes sur l'ensemble de la colonne d'eau avec des teneurs en oxygène de 9,5 mg/l qui atteignent progressivement 11,6 mg/l à la station P7. La station P4 se démarque des autres par un appauvrissement de la concentration en oxygène dissous après la zone de surface pour atteindre une concentration quasiment nulle à 15 mètres de profondeur, mettant en évidence des zones anoxiques.

Les éléments nutritifs :

Les concentrations générales en nutriment sont très faibles au sein de la retenue. Cela peut s'expliquer par différents facteurs :

- La faible occupation du sol du bassin versant direct de la retenue ;
- La présence de réservoirs situés en amont de la retenue qui peuvent stocker des nutriments et l'effet tampon de la retenue elle-même.

Le phosphore :

Les concentrations en phosphore total dans l'eau sont très faibles et en dessous de la limite de quantification (<0,05 mg/l) pendant le cycle annuel étudié.

L'ammonium :

De même, les concentrations en ammonium dans l'eau sont très faibles et en dessous de la limite de quantification (<0,02 mg/l) pendant le cycle annuel étudié. Le mois de janvier 2017 montre cependant des concentrations qui varient entre 0,012 et 0,57 avec un maximum localisé en P7.

L'azote:

- Les nitrites et l'azote Kjeldahl

Les concentrations en nitrite et en azote Kjeldahl sont très faibles et en dessous de la limite de quantification (<0,05 mNO₂g/l, 0,01 mN/l) sur l'ensemble de la période d'étude.

Les nitrates (Annexe 15 : Planche 4)

Les concentrations en nitrate sont généralement faibles sur l'ensemble des stations de la retenue. En période estivale (entre mai et septembre), les concentrations en nitrate sont très faibles et en dessous de la limite de quantification.

En période hivernal (entre novembre et février), les concentrations en nitrate sont légèrement plus élevées sur l'ensemble des relevés de la retenue d'Esparron. Les concentrations pendant cette période sont en moyenne de 0,8 à 1,1 mg NO₃/L⁻¹

Un gradient amont-aval est visible avec des concentrations plus élevées en aval de la retenue. La station P4 se démarque des autres par des concentrations plus élevées

La chlorophylle a (Annexe 15 : Planche 5) :

Les concentrations en chlorophylle-a restent en général faibles tout le long de la période d'échantillonnage.

Pendant la période de mélange, en hiver, la chlorophylle a est en général plus faible, elle atteint son minimum pendant le mois de novembre où elle reste en dessous des limites de quantification. Ce phénomène peut s'expliquer par de faibles températures et une diminution de la quantité de lumière qui réduit ainsi le développement algal malgré l'homogénéisation des nutriments sur la colonne d'eau.

Lors de la période de stratification thermique estivale, les teneurs les plus élevées de chlorophylle a sont relevées aux stations aval de la retenue d'Esparron pour les mois d'avril et mai du fait de la croissance du phytoplancton. Les valeurs maximales enregistrées sont de 5,5 chl-*a*.L⁻¹.

La retenue d'Esparron se caractérise par de faibles concentrations en nutriments et une grande transparence tout au long de l'année d'étude. Les concentrations en chlorophylle faible, avec des pics peu importants de manière générale, témoignent d'une activité phytoplanctonique peu importante. Il s'agit d'une retenue d'eau bien oxygénée en surface avec des conditions d'anoxie sur le fond à partir de 30 mètres de profondeur.

4.2 Etude de la représentativité du point unique de mesure réalisé par l'Agence de l'eau.

• **Méthode**

Une analyse de la campagne de mesure réalisée pendant l'année 2016 en appliquant la même méthodologie d'évaluation est effectuée pour les sept points d'échantillonnage de la retenue sur toute l'année entre janvier 2016 et janvier 2017 (Annexe 2, planches 1 à 4). Une analyse statistique est ensuite envisagée pour pouvoir évaluer la pertinence du choix de la station comme référence et du choix de la période de l'année échantillonnée.

Lorsque les concentrations mesurées pour un paramètre sont inférieures à leur limite de quantification, la valeur de la concentration prise en compte est celle de la limite de quantification de ce paramètre divisée par deux, comme préconisé dans le document [Ministère de l'Environnement, 2016].

4.2.1 Le protocole DCE d'évaluation des masses d'eau

L'évaluation de l'état écologique d'un plan d'eau prend en compte un ensemble d'indicateurs biologiques et physico-chimiques.

La méthodologie d'évaluation est basée sur des mesures acquises 4 fois par an à un seul endroit du lac, à l'aplomb du point le plus profond. Etant donné les variations spatio-temporelles des paramètres utilisés pour l'évaluation de la qualité d'eau, l'étude s'intéresse à la représentativité spatiale et temporelle du point unique de mesure.

Dans le protocole mis en place par la DCE pour l'évaluation des masses d'eau, les prélèvements sont effectués de manière intégrée sur toute la hauteur de la zone euphotique lors d'une campagne effectuée dans chacune des 4 périodes de l'année suivantes (Ministère de l'Environnement, 2016):

- FT1 (fenêtre temporelle 1) : à la fin de la période de brassage entre mi-février et fin mars ;
- FT2 : au début de la période de stratification thermique entre mi-mai et fin juin;
- FT3 : au milieu de la période de stratification thermique entre les mois de juillet et août;
- FT4 : à la fin de la période de stratification thermique qui s'étend de septembre à mi-octobre.

Deux campagnes de mesures consécutives doivent être séparées d'au moins 3 semaines. Ces prélèvements doivent aussi être réalisés au moins deux années par plan de gestion de six ans.

L'état écologique du plan d'eau est évalué par des indicateurs biologiques (poissons, macrophytes, invertébrés) et par des indicateurs physico-chimiques qui peuvent déclasser un plan d'eau par rapport à son évaluation par les indicateurs biologiques.

Les indicateurs physico-chimiques sont dans la réglementation en vigueur, basés sur quatre paramètres :

La concentration en ammonium (NH₄), la concentration en nitrate (NO₃), la concentration en phosphore total (Pt) et la profondeur de disparition du disque de Secchi (Sd).

L'indicateur biologique basé sur la concentration en chlorophylle-a (Chl-a) est calculé par la moyenne des trois valeurs intégrées dans la zone euphotique, prises chacune dans les fenêtres temporelles 2, 3 et 4.

Les indicateurs physico-chimiques basé sur les paramètres ammonium (NH₄) et nitrates (NO₃) sont calculés par le maximum des quatre valeurs intégrées dans la zone euphotique, prises chacune dans les quatre fenêtres temporelles.

Les indicateurs basés sur la transparence (Secchi) et le phosphore total (Pt) sont calculés par la médiane de quatre valeurs intégrées dans la zone euphotique, prises chacune dans les quatre fenêtres temporelles.

La classification de l'état écologique des masses d'eau est établie à partir de **cinq classes d'état écologique** délimitées par des valeurs seuils. Les limites de classes ont été déterminées suivant la méthode décrite dans le document de Danis, P.-A. & V. Roubeix (2014) pour les paramètres physico-chimiques (concentrations en nutriments et transparence) et dans le document de De Bortoli et Argillier (2008) pour la chlorophylle. Les valeurs-seuils pour le lac d'Esparron sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 15) :

Tableau 5: Indicateurs et valeurs-seuils des classes d'état de l'évaluation DCE (Sources: De Bortoli et Argillier, 2008 pour le paramètre de Chl-a; Rapport Onema/Irstea partenariat 2013)

Paramètre	Valeurs seuils des classes d'état			
	Très bon/Bon	Bon/Moyen	Moyen/Médiocre	Médiocre/Mauvais
Chla (µg.l ⁻¹)	2,15	3,86	6,93	12,43
Nitrate (µg.l-1)	2 000	4 899	12 000	29 394
Phosphore total (µg.l-1)	15	22	30	44
Ammonium (µg.l-1)	88	126	163	230
Transparence - valeur de Secchi (m)	3,15	2,26	1,64	1,18

• Résultat

4.2.2 Transposition du protocole à la campagne de mesure de la retenue d'Esparron

Les nitrates (Annexe 16, planche 1)

Les concentrations en nitrate sont généralement faibles sur l'ensemble des stations de la retenue voir en dessous de la limite de quantification, pour la période d'étude.

Les valeurs de concentration les plus élevées (en période hivernale entre novembre et février) sont en dehors des fenêtres temporelles de prélèvement fixées dans le protocole de la DCE.

Avec des pics maximaux de concentration à 1,12 mgNO₃/l pour la période hivernale, ces concentrations restent dans la classe Très bon, ne dépassant jamais le seuil de la classe Très bon fixé à 2 mgNO₃/l pour l'évaluation de l'état écologique du plan d'eau.

Le phosphore

Les profils de phosphore n'ont pas été réalisés du fait de leur concentration systématiquement en dessous de la limite de quantification (LQ = 0.05 mgPO₄/l) sur l'ensemble des relevés réalisés lors de la campagne de mesure entre janvier 2016 et janvier 2017.

L'ammonium (Annexe 16, planche 4)

Les concentrations en ammonium sont très faibles sur l'ensemble des relevés réalisés. Pour les stations amont de la retenue, P1 et P2, les concentrations sont dans la classe Très Bon, en dessous de la limite de quantification sur l'intégralité de la période d'échantillonnage.

Pour les stations localisées dans la partie aval de la retenue, P3, P4, P5 et P7 les concentrations présentent des pics en deux périodes dans l'année : juillet et janvier 2017 avec un maximum de 0,057 mg NH₄.L⁻¹.

L'ensemble des stations présentent des profils très nettement inférieurs aux limites de classe définies par la DCE (limite de classe Très bon/Bon = 0,088 mgNH₄/l), les pics de concentration ne dépassant pas 0,057 mgNH₄/l.

La profondeur de Secchi (Annexe 16, planche 3)

La station P1 a une profondeur maximale de 3 m qui ne permet pas d'analyser le paramètre de la profondeur de Secchi. En effet, le fond est visible depuis la surface.

La station P2 présente un profil un peu atypique. Comprise entre 7 et 10 m le reste de l'année, la profondeur de Secchi diminue au mois d'octobre à 3 m. Cette variation est située en dehors des fenêtres temporelles définies dans le cadre de l'évaluation DCE.

Pour les stations situées en aval, les profondeurs de Secchi sont situées entre 6 et 13 m, avec un maximum observé pendant la période hivernale (février) et pris en compte dans la fenêtre temporelle FT1. Les profondeurs de Secchi baissent pendant la période estivale entre juillet et septembre. Cette variation est prise en compte dans les fenêtres temporelles FT3 et FT4.

Comme pour les autres paramètres, la profondeur de Secchi mesurée pour chaque station se situe dans la classe Très Bon, les valeurs ne dépassant jamais la limite de classe Très Bon/Bon fixée à 3,15 m.

Chlorophylle-a (Annexe 16, planche 2)

Pour les stations amonts de la retenue P1 et P2, le pic de Chlorophylle-a (1,5 µg/L) qui correspond à un pic de biomasse de la végétation aquatique au printemps (avril) est situé en dehors des fenêtres temporelles définies par la DCE. La station P4 présente un profil similaire aux deux premières stations.

Les stations P6 et P7 présentent des profils similaires avec peu de variation de concentration tout au long de la période d'échantillonnage. Les concentrations, comprises entre 0 et 1,1 µg/L restent systématiquement dans la classe Très Bon, les concentrations ne dépassant pas le seuil de la classe Très Bon/Bon fixé par l'évaluation de l'état écologique par la DCE.

Les stations P3 et P5 présentent des profils particuliers.

Pour la station P3, deux pics de chlorophylle sont visibles sur l'ensemble des relevés réalisés pendant la période d'étude. Le premier pic se situe dans la FT2 pendant la période de printemps. Le second pic de chlorophylle à la fin de l'été. Ce dernier pic peut correspondre au pic de croissance du phytoplancton, rendu possible grâce au recyclage des nutriments. Ce dernier est situé dans la FT4 (Sommer, 1986). Ces deux pics dépassent le seuil de la classe d'état Très Bon/Bon à 2,15 µg/l.

La station P5 présente un seul pic de chlorophylle en début de période estivale dans la FT2. Avec une concentration de 5.65 µg/l, l'échantillon dépasse le seuil de classe Bon/Moyen fixé à 3,86 µg/l.

5 DISCUSSION

5.1 Bilan de la retenue

L'établissement du bilan de la retenue d'Esparron a montré un résultat positif à l'échelle annuelle : la retenue stocke des nutriments. Il en résulte un apport total de **46 645 kg N/an** et **5 372 kg P/an**. Ces résultats restent à considérer avec précaution étant donné l'incertitude liée aux estimations et à la complexité des facteurs et tous les phénomènes qui régissent les apports, les sorties et le stockage des éléments nutritif au sein de la retenue d'Esparron. Le bilan présenté permet uniquement de donner une estimation de ces flux.

5.1.1 – Les principales sources d'apports et domaines d'action

- Le Verdon constitue la principale source d'apport en éléments nutritif de la retenue d'Esparron (Figure 9). Ceci démontre la nécessité d'une cohérence dans la gestion de la ressource à l'échelle du bassin versant et de la solidarité amont-aval mise en place par le Parc du Verdon à travers les différents partenariats entre les usagers de la ressource.

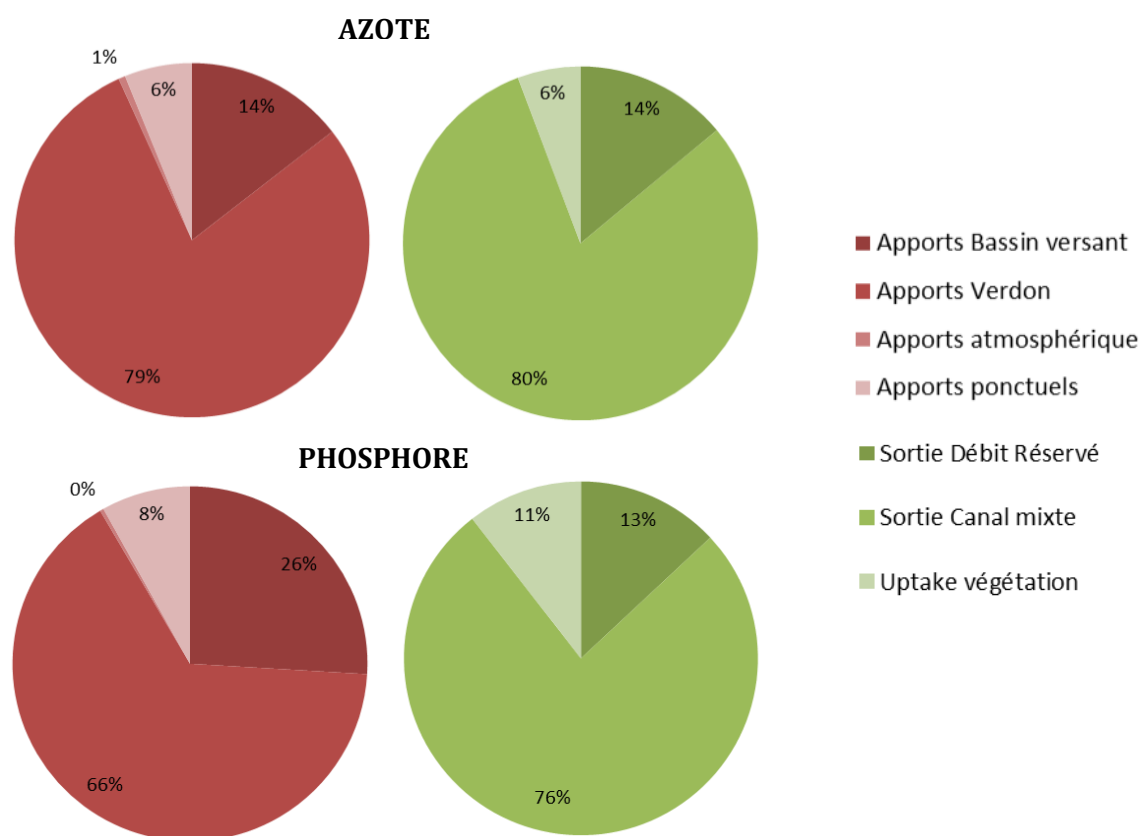


Figure 9: Apports et pertes en azote et phosphore au sein de la retenue d'Esparron

- Les apports par le bassin versant issus de l'usage du sol constituent la deuxième plus importante source d'apports (14% des apports en azote et 26% des apports pour le phosphore). Ces données correspondent aux nutriments produits par l'usage du sol. Il est cependant difficile

d'estimer la part réelle de ce flux qui intègre la retenue d'Esparron compte tenu de la distance importante entre les zones à plus fort taux de production et la retenue d'eau. Ces espaces occupés majoritairement par des forêts de feuillus ou pourrait faire l'effet de zones tampons. D'un autre côté, le contexte karstique du bassin versant est un paramètre à prendre en compte dans le transfert des nutriments produits par les usages du sol. Cette part des apports à la retenue pourraient donc être surestimées.

De nombreuses études ont montrées l'importance de l'occupation des terres du bassin versant des lacs et leur influence considérable sur la production primaire et donc sur le statut trophique (J. Capblancq, 2002).

- Les apports issus des rejets (6% pour l'azote et 8% pour le phosphore) constituent une part non négligeable du bilan. Ces rejets ponctuels accentués par la fréquentation touristique en période estivale peuvent être considérablement réduits par une gestion et une amélioration des sites sensibles.

Différentes mesures prises par les communes ont montrées une amélioration des rejets issus des STEP qui s'est traduit visuellement par une diminution ponctuelle de la croissance de la végétation aquatique. Cela passe par une amélioration des stations d'épuration. La mise en conformité des installations de Quinson en 2011 et Esparron de Verdon en 2010 a permis une augmentation des capacités de traitement, adaptées à l'accroissement de population sur le territoire en période estivale, une absence de rejet de surface par traitement tertiaire et un éloignement des traitements par rapport à la retenue (Esparron-de-Verdon).

Des témoignages apportés par des usagers du plan d'eau ont indiqué une réduction de la croissance de la végétation aquatique en rive droite de la retenue d'Esparron sur la commune de Quinson

Un élément d'amélioration serait le raccordement au réseau d'assainissement communal des habitations sur l'ensemble du territoire d'étude ainsi que l'installation de déversoirs d'orage qui pourraient diminuer l'impact des rejets en cas de situations exceptionnelles (pannes, événements pluvieux...). Ces dysfonctionnements ont été montrés dans l'étude de Cereg Territoires, Rapport, Etude de profil des eaux de baignade sur le Lac d'Esparron : Anses 1 & 2, 2011)

Le compartiment des sédiments n'a pas été étudié lors de ce travail. Toutefois, une part de ces apports en nutriments dans la retenue peut être stockée dans les sédiments et donc plus disponibles dans la colonne d'eau. Une étude plus complète sur la composition des sédiments pourraient apporter des éléments de réponse quant au stockage des éléments nutritifs dans les sédiments et leur contribution à la croissance de la végétation aquatique. Un moyen de gestion de ce compartiment consisterait à enlever à des endroits bien précis (gènes du développement de la végétation aquatique lié à la charge des sédiments avérée) une partie des sédiments de manière à supprimer la charge de phosphore accumulée dans le compartiment.

5.1.2 Rôle de la végétation aquatique dans la retenue d'eau et éléments de gestion

Le bilan a montré que la végétation aquatique joue un rôle de stockage des éléments nutritifs au sein de la retenue d'Esparron. Ils contribuent pour **11 209 kg N/an** et **1 401 kg P/an** soit respectivement **6 et 11 % des apports totaux** en nitrate et phosphore.

Le rôle épuratoire des plantes aquatiques a été mis en évidence dans de nombreuses études. Dans le cas de la retenue d'Esparron. On peut considérer que les macrophytes ont un impact sur la qualité de l'eau.

L'abondance des macrophytes, enracinés ou non, est représentative des caractéristiques générales du milieu et peut donner des indications sur le niveau trophique d'un plan d'eau. Une augmentation de la densité et de la superficie des herbiers aquatiques est généralement signes d'eutrophisation

du milieu (Kalff, 2002; RAPPEL, 2005). La luminosité, le type de substrat, l'apport en éléments nutritifs ainsi que la température et la transparence de l'eau sont tous des paramètres qui influencent le type et la densité de plantes qui colonisent le milieu.

L'analyse des apports en éléments nutritifs au sein de la retenue permet en partie d'expliquer le développement plus important des macrophytes. La retenue reçoit à l'échelle annuelle un apport en éléments nutritifs nécessaire à la croissance de la végétation aquatique. De plus, une partie du phosphore qui entre dans le système peut s'accumuler dans les sédiments. La part de phosphore stocké pourrait alors constituer une réserve interne à la retenue et ainsi alimenter la croissance de la végétation aquatique qui se nourrit pour certaines espèces par leurs systèmes racinaires.

Dans le texte de projet de directive « Nitrate » du 22/12/1988, la commission reconnaît que : « la croissance normale des algues requiert environ dix fois plus d'azote que de phosphore. Dans les eaux douces, la quantité d'azote disponible par rapport à celle du phosphore dépasse cette proportion, si bien que le phosphore est souvent l'élément nutritif qui limite la croissance des algues ».

Agir sur les sources d'apport en phosphore pourrait alors constituer un facteur de maîtrise pour ramener la prolifération végétale à une valeur proche de ce qu'elle est en conditions naturelles. C'est une approche développée dans de nombreux cas notamment dans des études sur le lac Léman portant sur la même problématique.

Le limnologue suisse E.A Thomas a établi les bases de la maîtrise des proliférations algales concernant le phosphore et l'azote, en considérant le phosphore comme l'élément de maîtrise.

5.2 Etat trophique et Evolution de la retenue d'Esparron

5.2.1 Généralités sur l'état trophique d'un lac

L'eutrophisation est un processus de vieillissement naturel d'un lac qui se produit sur une très longue période (milliers d'années) et entraîne des changements dans les propriétés physico-chimiques et biologiques de la retenue d'eau. Il se traduit par un enrichissement progressif du lac en nutriments.

Les activités anthropiques présentes sur la retenue et le bassin versant peuvent entraîner un vieillissement prématuré du lac. L'eutrophisation causée par les influences humaines aux cours des années entraîne un développement excessif des algues et des plantes, une diminution de la limpidité du lac et de la pénétration de la lumière, et des concentrations d'oxygène qui peuvent avoir des répercussions sur la vie aquatique ainsi que sur les usages du plan d'eau (Annexe 17). Lors du processus d'eutrophisation, un lac passe par différents stades, appelés états trophiques qui correspondent au degré d'eutrophisation d'un lac et de son niveau d'enrichissement en nutriment ou de sa productivité primaire. Le niveau trophique d'un plan d'eau varie d'ultra-oligotrophe à hyper-eutrophe suivant sa productivité faible à élevée.

Le niveau trophique d'un plan d'eau est déterminé en mesurant trois variables de surface du lac : la concentration en phosphore total, la biomasse phytoplanctonique (chlorophylle a) et la transparence. Son évaluation permettra de voir si l'eutrophisation est avancée ou non.

La moyenne de chaque variable² est comparée à des valeurs de référence. Une cote trophique est ensuite attribuée au plan d'eau après l'analyse des paramètres mesurés. Lorsque ceux-ci ne

² Les moyennes réfèrent à la moyenne estivale ou à la moyenne de la période libre de glace. La moyenne estivale correspond à la période durant laquelle il y a une stratification thermique de l'eau entre la surface et

concordent pas, on peut choisir d'utiliser la concentration en chlorophylle α . En effet, il s'agit d'un descriptif biologique intégrateur de la physico-chimie du plan d'eau pris dans son ensemble (Simoneau et al., 2004).

5.2.2 Le stade trophique de la retenue d'Esparron

La **retenue d'Esparron** est classée parmi les lacs **oligotrophes** pendant la période d'étude (janvier 2016 à janvier 2017) avec une concentration moyenne en chlorophylle a de 1,19 $\mu\text{g/l}$, et une profondeur moyenne de Secchi de 7,84 m. Ces valeurs ont été calculées sur la période stratifiée de mai à septembre 2016 sur les stations P3 à P7 (Figure 10). La limite de quantification pour le phosphore étant trop élevée pour classer ce paramètre, le stade trophique de la retenue pour ce paramètre ne peut être déterminé avec précision entre le stade mésotrophe et oligotrophe.

Classes trophiques		Phosphore total ($\mu\text{g/l}$)	Chlorophylle a ($\mu\text{g/l}$)	Transparence (m)
Classe principale	Classe secondaire (transition)	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Ultra-oligotrophe		< 4	< 1	> 12
Oligotrophe		4,0 - 10	1,0 - 3	12,0 - 5
	Oligo-mésotrophe	7,0 - 13	2,5 - 3,5	6,0 - 4
Mésotrophe		10,0 - 30	3,0 - 8	5,0 - 2,5
	Méso-eutrophe	20,0 - 35	6,5 - 10	3,0 - 2
Eutrophe		30,0 - 100	8,0 - 25	2,5 - 1
Hyper-eutrophe		> 100	> 25	< 1

Figure 10: Diagramme de classement du niveau trophique des lacs (Source: MDDELCC, 2015)

Un suivi des paramètres physico-chimiques et biologiques sur les années à venir permettra de caractériser l'évolution de la retenue.

5.2.3 Élément limitant

Dans les années '60 Redfield a mis en évidence un rapport optimal entre carbone, azote et phosphore, nécessaire au développement de la biomasse algale. Ce rapport molaire C/N/P, dit « rapport de Redfield », a été évalué à 108/16/1 (Redfield, 1963). Un élément nutritif est limitant lorsqu'il est en dessous de ce rapport. Alors, malgré l'abondance des autres éléments, la biomasse algale ne se développe pas de façon optimale.

En général, le carbone ne limite pas la croissance des algues sauf dans les étangs très riches ou dans les lagunes d'eaux usées, où l'eau est saturée en azote et en phosphore³. Pour cette raison seront ici discutés uniquement l'azote et le phosphore, limitant habituellement la croissance des végétaux aquatiques dans les eaux de surface (Bergeron, et al., 2002).

L'étude de ces deux éléments nutritifs au sein de la retenue d'Esparron peut amener des éléments de réponse quant à la gestion de la prolifération des herbiers aquatique du Verdon dans laquelle s'inscrit cette étude. L'estimation de l'élément le plus susceptible d'être limitant au sein de la retenue d'Esparron est réalisée en calculant le rapport azote/phosphore (N/P) de la retenue⁴.

le fond du lac pour les lacs suffisamment profonds (Source : Diagnose primaire du lac des Sources, 2010, Rapport, Mont-Laurier)

³(Source : <http://www.obvcapitale.org/plans-directeurs-de-leau-2/2e-generation/diagnostic/section-1-problematiques-associees-a-la-qualite-de-leau/1-5-presence-de-nutriments-et-de-matieres-en-suspension>)

⁴Lorsque les concentrations sont situées en dessous de la limite de quantification, le calcul est effectué avec les limites de quantification divisées par deux (LQ phosphore total = 0,05 mg/l, LQ nitrate = 0,5 mg/l, LQ nitrite = 0,01 mg/l, LQ azote Kjeldahl = 0,5 mg/l).

Le contenu cellulaire des macrophytes est en moyenne composé d'azote et de phosphore dans une proportion 16 pour 1 (mole par mole). Si ce rapport dans l'environnement dépasse cette norme physiologique, il est probable que le phosphore soit l'élément limitant. A l'inverse s'il est inférieur, l'azote est probablement limitant.

Les points de la retenue échantillonnés montrent un rapport qui varie d'amont en aval entre 14,74 et 20,18, le maximum de ce rapport est observé pour la station P4 (Figure 11).

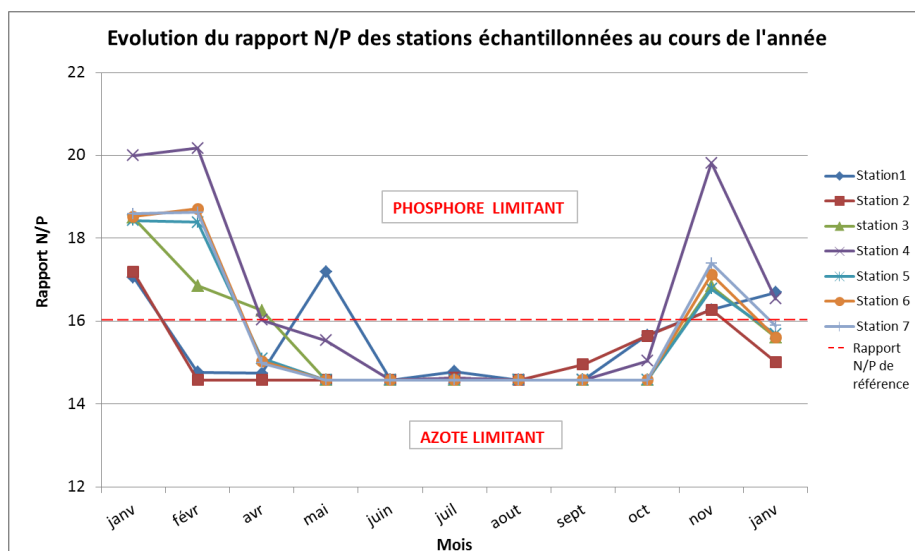


Figure 11 : Evolution du rapport N/P entre les stations d'échantillonnage de la retenue d'Esparron

Le **gradient amont aval** de la retenue peut s'expliquer par une concentration en azote total (nitrate, nitrites et azote Kjeldahl) plus importante en aval de la retenue qui peut s'expliquer par un phénomène d'accumulation en nutriment en aval. Le rapport plus élevé à la station 4 est certainement dû à des apports en azote plus importants en ce point localisé au niveau de la commune d'Esparron-de-Verdon.

L'analyse de l'évolution du rapport N/P au cours de l'année (Figure 12) confirme le gradient observé entre les stations amont-aval.

De plus, deux périodes peuvent être distinguées :

- **La période hivernale**, entre novembre et avril, montre un rapport N/P plus élevé (N non limitant). On considère l'azote total comme étant l'élément de variation (le phosphore total étant systématiquement en-dessous des limites de quantification).

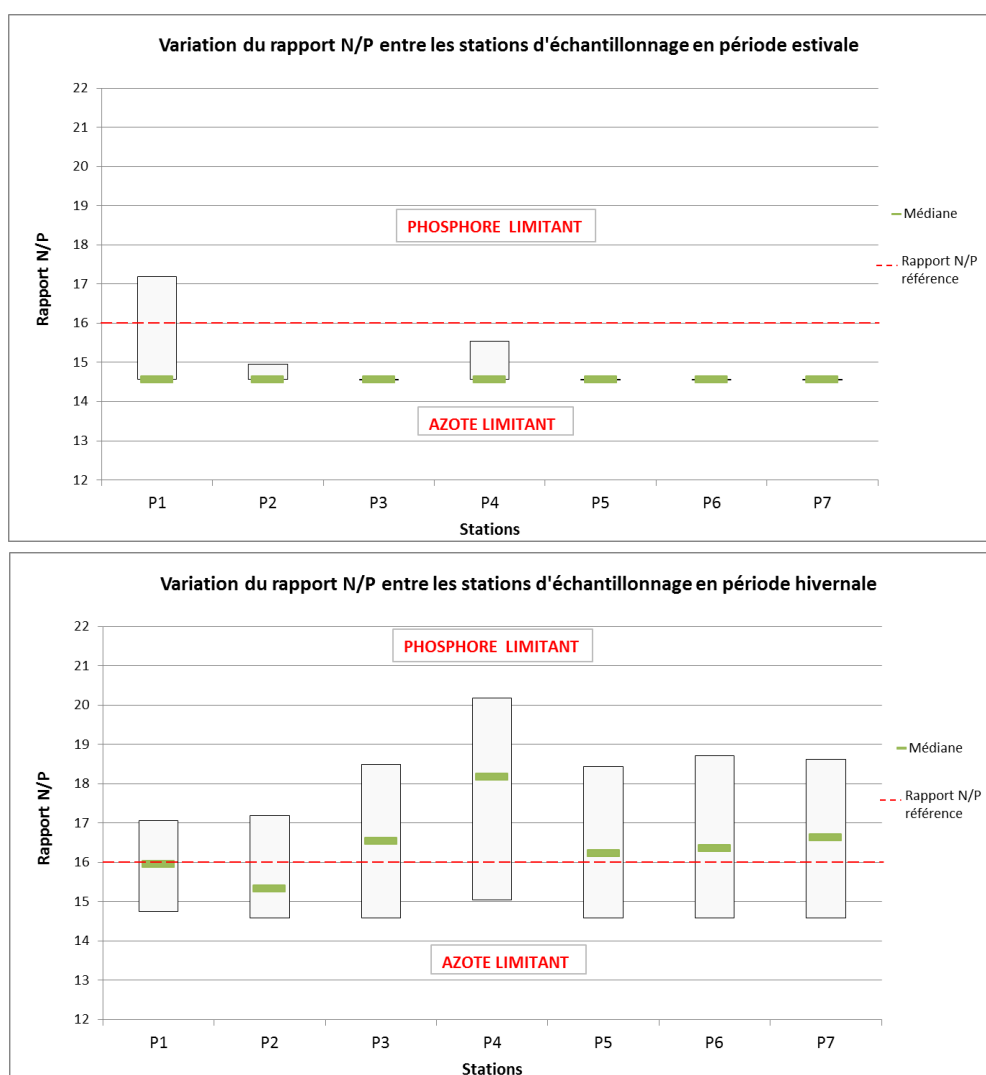


Figure 12: Evolution du rapport N/P pour les différentes stations d'échantillonnage au cours de l'année

Ainsi, les résultats obtenus montrent des apports en azote plus importants pendant la période hivernale qui peuvent s'expliquer par une augmentation de l'apport par le bassin versant par le lessivage des sols plus important issus des pluies hivernales ainsi que par l'apport des tributaires en saison hivernale.

- La **période estivale**, entre mai et octobre montre un rapport N/P plus faible avec une moyenne de 15,5. Cela s'explique par une diminution de l'azote total présent pendant cette période avec sans doute une diminution des apports diffus issus du bassin versant. Durant cette période, l'azote est l'élément limitant.

Avec les données actuelles il n'est pas possible de déterminer avec précision l'élément limitant de la retenue. En revanche, on peut noter qu'une variation de 0,020 mgP/l en moyenne peut être déterminante dans l'évolution physico-chimique de la retenue.

5.3 Représentativité du point unique de mesure : discussion sur la pertinence des indicateurs

La campagne de mesure effectuée à l'échelle d'une année, entre janvier 2016 et janvier 2017 a eu pour objectif d'évaluer l'état physico-chimique de la retenue d'Esparron sur une échelle temporelle et spatiale suffisamment large pour prendre en compte les différents événements physiques et biologiques qui impactent le lac.

Les résultats ont permis dans un premier temps de dresser un état zéro de la retenue puis de discuter sur la réelle représentativité des mesures effectuées par l'Agence de l'Eau en un seul point de la retenue sur des périodes de l'année bien définies.

La qualité de l'eau de la retenue d'Esparron est classée dans l'état Très Bon avec des concentrations en nutriments globalement très faibles voire en dessous des limites de quantification, sur l'ensemble de l'année.

- Les fluctuations observées pour les paramètres physico-chimiques **nitrate, ammonium et profondeur de Secchi**, restent dans la classe « Très bon », sans dépasser la limite vers la classe « Bon », quel que soit le point d'échantillonnage et la période considérée. Ainsi une étude statistique concernant le choix des stations pour l'évaluation de l'état écologique DCE semble peu pertinente pour ces paramètres, au vu des résultats.

- En ce qui concerne les analyses du **phosphore**, les résultats obtenus sont situés systématiquement en dessous de la limite de quantification (LQ=0.05 mg P/L) du laboratoire d'analyse de la Société du Canal de Provence.

Il se révèle que cette limite de quantification, bien que très utilisée pour les analyses courantes de qualité d'eau, n'est pas adaptée aux besoins plus précis d'analyse et d'interprétation pour cette étude.

Le phosphore est un élément clé dans l'analyse de l'état d'une retenue d'eau. Comme démontré dans plusieurs études, il constitue le facteur de contrôle et de développement des producteurs primaires. Il est souvent désigné comme responsable des dérèglements trophiques (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 1997, BARROIN, G. 1999, IIGGE - Institut International de gestion et de génie de l'environnement, 1988)

Dans certains systèmes, un impact sur les communautés végétales (algues et macrophytes) et animales (macro-invertébrés) a été noté dès 0,012 à 0,015 mg/l (Richardson, C.J. et al., 2007, King, R.S. and Richardson, C.J. 2003)

De plus il a été montré que dans de nombreux cas, les systèmes lacustres, de par leur fonctionnement et le temps de séjour de l'eau, sont plus sensibles à une légère augmentation des teneurs. Cette sensibilité provoque des changements d'état qui peuvent être observés dès 0,010 mg/l pour des systèmes oligotrophes peu profonds (Chauvin C., Bougon N., 2011).

Les limites de classe d'état pour le phosphore étant plus faibles que la limite de quantification (Tableau 6), il n'est pas possible d'évaluer la représentativité du point de mesure de l'Agence de l'Eau en ce qui concerne ce paramètre.

Au vu de l'importance du paramètre phosphore total dans le système, il paraît nécessaire pour un suivi futur de la retenue d'adapter les protocoles d'analyse en laboratoire.

- L'analyse des concentrations en **chlorophylle-a** montre que la variabilité spatiale et temporelle des données n'est pas toujours prise en compte dans l'évaluation de l'état DCE de la retenue.

La variabilité temporelle

Le pic de chlorophylle observé pendant la première inflorescence printanière (avril-mai) est situé entre FT1 et FT2 et donc, non pris en compte dans l'évaluation de l'état écologique de la masse d'eau. Le protocole DCE peut donc rater ces valeurs maximales.

Dans le cas de la retenue d'Esparron, ces valeurs restent néanmoins en dessous de la limite de classe Très bon/Bon et ne sont pas déclassantes quel que soit la période de l'année choisie.

La variabilité spatiale

En ce qui concerne les stations P3 et P4 pour lesquelles des pics de chlorophylle plus importants ont été observés, une moyenne arithmétique des valeurs situées dans les fenêtres temporelles 2, 3 et 4 est réalisée (Tableau 6) de manière à déterminer si ces variations de concentrations pourraient avoir un impact sur l'évaluation de l'état écologique de la masse d'eau.

Tableau 6: Moyenne arithmétique des concentrations en Chlorophylle-a pour les stations d'échantillonnage P3 et P5.

Station	Concentration en Chl-a (µg/l)			Moyenne arithmétique (µg/l)
	Mai	Juillet	Septembre	
P3	3,2	1,1	2,3	2,2
P5	5,6	1,0	1,2	2,6

Ces deux stations montrent que des processus biologiques locaux avec des pics de chlorophylle plus importants peuvent avoir une influence sur l'évaluation de la qualité des eaux de la retenue.

En effet, si elles sont choisies comme références, les stations P3 et P5 peuvent déclasser l'état de la retenue au niveau Bon pour le paramètre chlorophylle (la limite de classe Très bon/Bon étant fixée à 2,15 µg/l).

Ainsi les hétérogénéités spatiales de Chl-a induisent une légère variabilité spatiale de l'état de la retenue d'Esparron. En revanche, les variations temporelles au cours du cycle annuel échantillonné n'ont pas d'impact sur l'évaluation DCE de la retenue.

Cette étude sera à compléter avec les résultats des données satellites pour analyser la variabilité interannuelle qui peut être significative.

6 CONCLUSION

Le bilan de la retenue d'Esparron a mis en évidence un enrichissement en éléments nutritifs (azote, phosphore) à l'échelle annuelle. Cela implique une accumulation progressive de nutriments au sein de la retenue dont une partie est absorbée par la végétation aquatique, et une autre pourrait intégrer les sédiments.

L'observation d'un développement important de Potamogéton, Myriophylles etc. dans la retenue est un élément qui appuie ce constat.

Le phosphore accumulé dans les sédiments peut constituer une charge interne à la retenue et être libéré en condition anoxiques, conditions qui ont été constatées sur plusieurs profils d'oxygène aux points les plus profonds, réalisés sur la colonne d'eau. Le phosphore pourrait constituer l'élément de maîtrise pour ramener la prolifération de la végétation proche d'un état naturel sans toutefois l'éliminer.

Bien que gênante pour certains usages, la végétation aquatique a un rôle épuratoire au sein de la retenue d'Esparron. En effet, comme mis en évidence dans cette étude, le rôle de stockage des nutriments par la végétation aquatique contribue ainsi, à améliorer la qualité de l'eau.

L'analyse de l'état trophique a confirmé le statut oligotrophe de la retenue d'Esparron.

Les moyens de gestion possibles pour assurer la pérennité de la ressource tout en conservant et développant les usages qui lui sont associés s'appuient sur une gestion des compartiments en lien avec les principales sources d'apports à savoir: les apports par le Verdon, les apports diffus liés à l'usage du territoire, les rejets issus de la population sédentaire et touristique.

Une nouvelle étude cartographique des herbiers de la retenue d'Esparron, réalisée par la SCP, est prévue pour l'année 2018. Elle aura pour but d'actualiser les données de la campagne de 2008 et à cette occasion permettra de juger si une régression des herbiers est constatée qui pourrait être en lien avec l'amélioration des STEP de Quinson (2011) et d'Esparron-de-Verdon (2010).

Un suivi des paramètres physico-chimiques dans les années à venir pourrait statuer avec plus de précision sur l'évolution de la retenue d'Esparron. Le compartiment des sédiments pourrait faire l'objet d'une étude plus poussée avec une attention particulière et une analyse plus précise de l'élément phosphore.

L'analyse de la répartition des nutriments au sein de la retenue d'Esparron a également permis de démontrer que le protocole d'évaluation DCE est représentatif de l'état écologique de la retenue qui malgré les pressions anthropiques multiples, conservent une bonne qualité de ses eaux.

BIBLIOGRAPHIE

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 1997. Eutrophisation des milieux aquatiques : bilan des connaissances et stratégies de lutte. Notice SDAGE n°2, décembre 1996. 26 p.

Albiges C., Pierre D., Saggiocco M., 1991. Evaluation des apports en azote et en phosphore des bassins versants. Annexe 1 A: 35 pp + annexes. In Ximenes M.C., 1991. Efficacité de la réduction de la masse des nutriments dans la prévention des malaïgues. Application aux étangs Palavasiens. CEMAGREF-USTL-Faculté de Pharmacie, Montpellier.

Atlas de l'hébergement touristiques des Alpes-de-Haute-Provence, Agence de développement touristique Alpes de Hautes-Provence, 2008.

BARROIN, G. 1999. Limnologie appliquée au traitement des lacs et des plans d'eau. Etude Agences de l'eau n° 62, janvier 1999. 201 p.

Benneton, J. P. (1984). The eutrophization of water surfaces, inventory of the principal sources of nitrogenous and phosphorous substances. Bibliographic study. LCPC.

Capblancq, J., & Décamps, H. (2002). L'eutrophisation des eaux continentales: questions à propos d'un processus complexe. *Nature Sciences Sociétés*, 10(2), 6-17.

Chauvin C. et Bougon N, 2011 : Analyse des paramètres physico-chimiques dans les réseaux de mesure DCE pour une utilisation explicative de l'état écologique – Importance des limites de quantification et des fractions analysées. Aquareff

Clarke, S. J. (2002). Vegetation growth in rivers: influences upon sediment and nutrient dynamics. *Progress in Physical Geography*, 26(2), 159-172.

Danis, P.-A. & V. Roubeix (2014) : Physico-chimie soutenant la biologie des plans d'eau nationaux : Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils & Amélioration des connaissances par la télédétection. Rapport d'avancement. Convention Onema/Irstea 2013. 82 p.

D'Autilia, R., Falcucci, M., Hull, V., & Parrella, L. (2004). Short time dissolved oxygen dynamics in shallow water ecosystems. *Ecological Modelling*, 179(3), 297-306.

De Bortoli, J., & Argillier, C. (2008), Définition des conditions de référence et des limites des classes d'état sur la base d'une approche pression/impact, Aix-en-Provence, Cemagref

De Bortoli, J., M. Daufresne, et al. (2007). Définition des conditions de référence sur les plans d'eau - Paramètre chlorophylle-a. Aix-en-Provence, Cemagref

Desmet, N. J. S., Van Belleghem, S., Seuntjens, P., Bouma, T. J., Buis, K., & Meire, P. (2011). Quantification of the impact of macrophytes on oxygen dynamics and nitrogen retention in a vegetated lowland river. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(12), 479-489.

IIGGE - Institut International de gestion et de génie de l'environnement, 1988. Plans d'eau, de l'autre côté du miroir. Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, novembre 1988. 121 p.

Jansson, M., Andersson, R., Berggren, H., Leonardson, L., 1994. Wetlands and lakes as nitrogen traps. *Ambio* 23, 320-325.

King, R.S. and Richardson, C.J. 2003. Integrating Bioassessment and Ecological Risk Assessment: An Approach to Developing Numerical Water-Quality Criteria. *Environmental Management* 31: 795–809.

Le Cohu, R., Comoy, N., Guitard, J., & Brabet, J. (1991, January). Périodicité du phytoplancton dans un réservoir de moyenne profondeur: le lac de Pareloup (Massif central, France), un exemple de succession cyclique. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* (Vol. 27, No. 3, pp. 197-214). EDP Sciences.

Lee, P.F., McNaughton, K.A., 2004. Macrophyte induced microchemical changes in the water column of a northern Boreal Lake. *Hydrobiologia* 522, 207–220.

Loÿe-Pilot, M. D., Martin, J. M., & Morelli, J. (1990). Atmospheric input of inorganic nitrogen to the Western Mediterranean. *Biogeochemistry*, 9(2), 117-134.

Madsen, T. V., & Cedergreen, N. (2002). Sources of nutrients to rooted submerged macrophytes growing in a nutrient-rich stream. *Freshwater Biology*, 47(2), 283-291.

[Ministère de l'Environnement, 2016] Ministère de l'Environnement, d. l. e. d. l. M. (2016), Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau).

Mignon C., Copin-Montregut G., Elegant L, Morelli J., 1989. Etude de l'apport atmosphérique en sels nutritifs au milieu côtier méditerranéen et implications biogéochimiques. *Océanologica Acta*, 12 (2):187-191.

Ozimek, T., Vandonk, E., Gulati, R.D., 1993. Growth and nutrient-uptake by 2 species of *Elodea* in experimental conditions and their role in nutrient accumulation in a macrophyte-dominated Lake. *Hydrobiologia* 251, 13–18.

Payraudeau, S., Tournoud, M. G., Cernesson, F., & Picot, B. (2001). Annual nutrients export modelling by analysis of landuse and topographic information: case of a small Mediterranean catchment. *Water Science and Technology*, 44(2-3), 321-327.

Ponds and Small Lakes, Brian Moss, PELAGIC PUBLISHING, Naturalist's Handbooks 32, Ecology and Identification

Richardson, C.J., King, R., Qian, S., Vaithiyanathan, P., Qualls, R.G., and Stow, C.A. 2007. Estimating Ecological Thresholds for Phosphorus in the Everglades. *Environ. Sci. Technol.* 41 :8084–8091.

Reckhow, K. H., & Simpson, J. T. (1980). A procedure using modeling and error analysis for the prediction of lake phosphorus concentration from land use information. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(9), 1439-1448.

Redfield, A. C. (1963). The influence of organisms on the composition of seawater. *The sea*, 2, 26-77.

Rommens, W., Maes, J., Dekeza, N., Inghelbrecht, P., Nhiwatiwa, T., Holsters, E., Ollevier, F., Marshall, B., Brendonck, L., 2003. The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). *Water quality. Archiv Fur Hydrobiologie* 158, 373–388.

Schaffner, W. R., & Oglesby, R. T. 1978. Phosphorus loadings to lakes and some of their responses. Part 1. A new calculation of phosphorus loading and its application to 13 New York lake. *Limnology and Oceanography*, 23(1), 120-134.

Sommer, U. (1986). The periodicity of phytoplankton in Lake Constance (Bodensee) in comparison to other deep lakes of central Europe. *Hydrobiologia*, 138(1), 1-7.

Synthèse de l'état des lieux du bassin versant du Verdon.

Van Duin, E. H. S., & Lijklema, L. 1989. Modelling photosynthesis and oxygen in a shallow, hypertrophic lake. *Ecological modelling*, 45(4), 243-260.

Vollenweider, R. A., 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to phosphorus and nitrogen as factors in eutrophication. Tech. Rep. OECD Paris, DAS/CSI/58-27: 1-159.

Vollenweider, R. A. (1971). Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Paris: Organisation for economic co-operation and development.

Worrall, F., & Burt, T. P. 1999. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models. *Journal of Hydrology*, 221(1), 75-90.

Yan, W.J., Yin, C.Q., Tang, H.X., 1998. Nutrient retention by multipond systems: mechanisms for the control of nonpoint source pollution. *Journal of Environmental Quality* 27, 1009-1017.

TABLE DES FIGURES

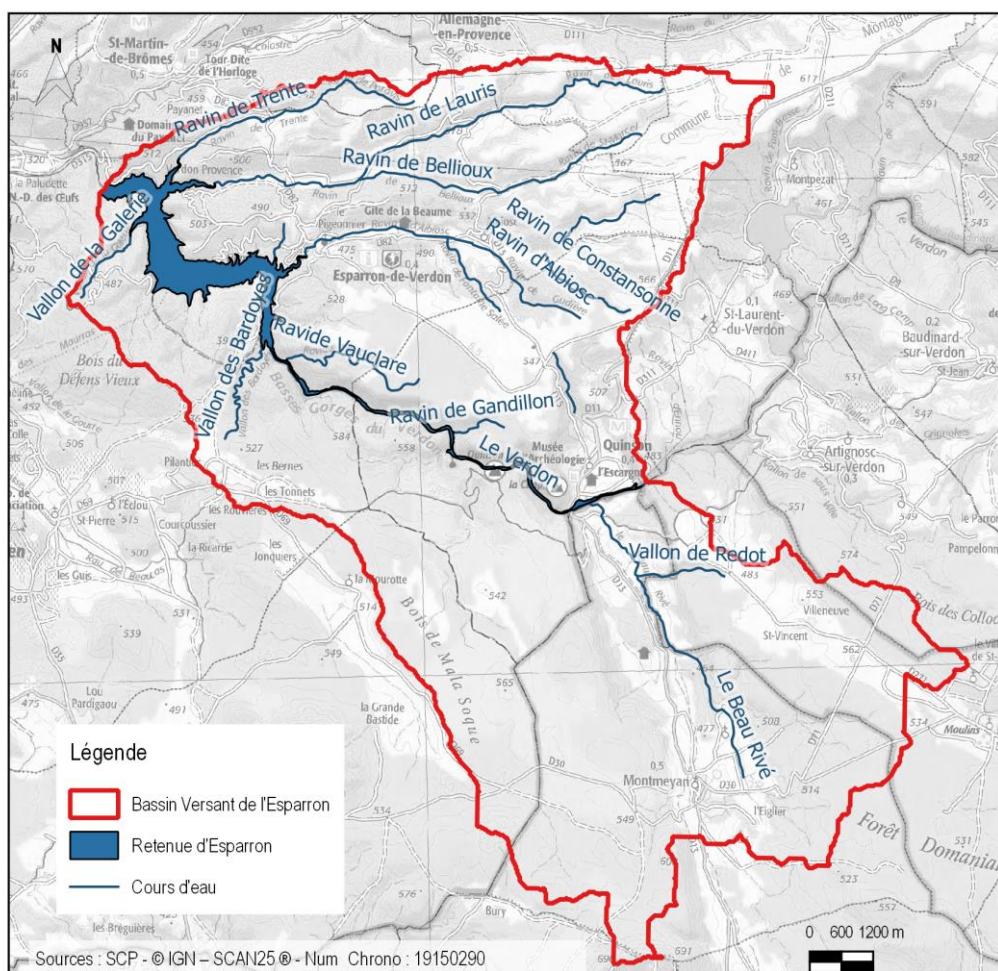
Figure 1: Délimitation de la retenue d'Esparron (carte réalisée avec le logiciel QGIS).....	5
Figure 2: Répartition de l'occupation du sol sur le bassin versant de l'Esparron (Source: CRIGE, 2014).....	8
Figure 3: Emplacement des points d'échantillonnage sur la retenue d'Esparron (Carte réalisée avec le logiciel QGIS).....	11
Figure 4: Illustration de découpage du bassin versant de la retenue d'Esparron grâce à un modèle numérique de terrain (réalisé avec le logiciel QGIS).....	13
Figure 5: Bilan hydrique de la retenue d'Esparron (en Mm ³ /an).....	13
Figure 6: Identification des différents compartiments du système hydrologique de la retenue d'Esparron.....	14
Figure 7 : Pourcentages d'azote et de phosphore produits en fonction de l'occupation du sol.....	17
Figure 8: Schéma bilan des apports et pertes de la retenue d'Esparron par an.....	22
Figure 9: Apports et pertes en azote et phosphore au sein de la retenue d'Esparron.....	30
Figure 10: Diagramme de classement du niveau trophique des lacs (Source: MDDELCC, 2015).....	33
Figure 11 : Evolution du rapport N/P entre les stations d'échantillonnage de la retenue d'Esparron.....	34
Figure 12: Evolution du rapport N/P pour les différentes stations d'échantillonnage au cours de l'année.....	35

TABLE DES TABLEAUX

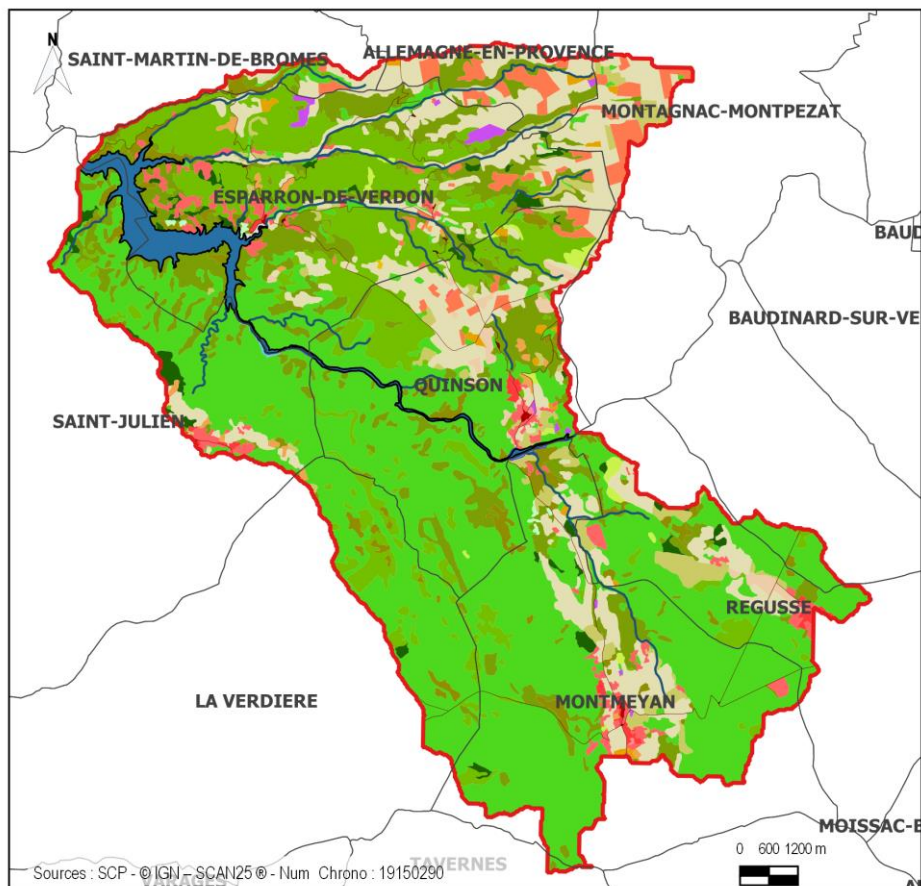
Tableau 1 : Caractéristiques physiques de la retenue d'Esparron.....	6
Tableau 2 : Masse d'eau et objectifs de bon état sur la zone d'étude (Source : SDAGE Rhône Méditerranée Corse 2016-2021).....	10
Tableau 3: Récapitulatif des opérations de prélèvement.....	12
Tableau 4: Sources et méthodes d'analyse utilisées pour établir le bilan de la retenue d'Esparron.....	15
Tableau 6: Indicateurs et valeurs-seuils des classes d'état de l'évaluation DCE (Sources: De Bortoli et Argillier, 2008 pour le paramètre de Chl-a; Rapport Onema/Irstea partenariat 2013).....	28
Tableau 7: Moyenne arithmétique des concentrations en Chlorophylle-a pour les stations d'échantillonnage P3 et P5.	37

ANNEXES

Annexe 1 : Carte du réseau hydrographique de la retenue d'Esparron (Carte réalisée avec le logiciel Ogis)



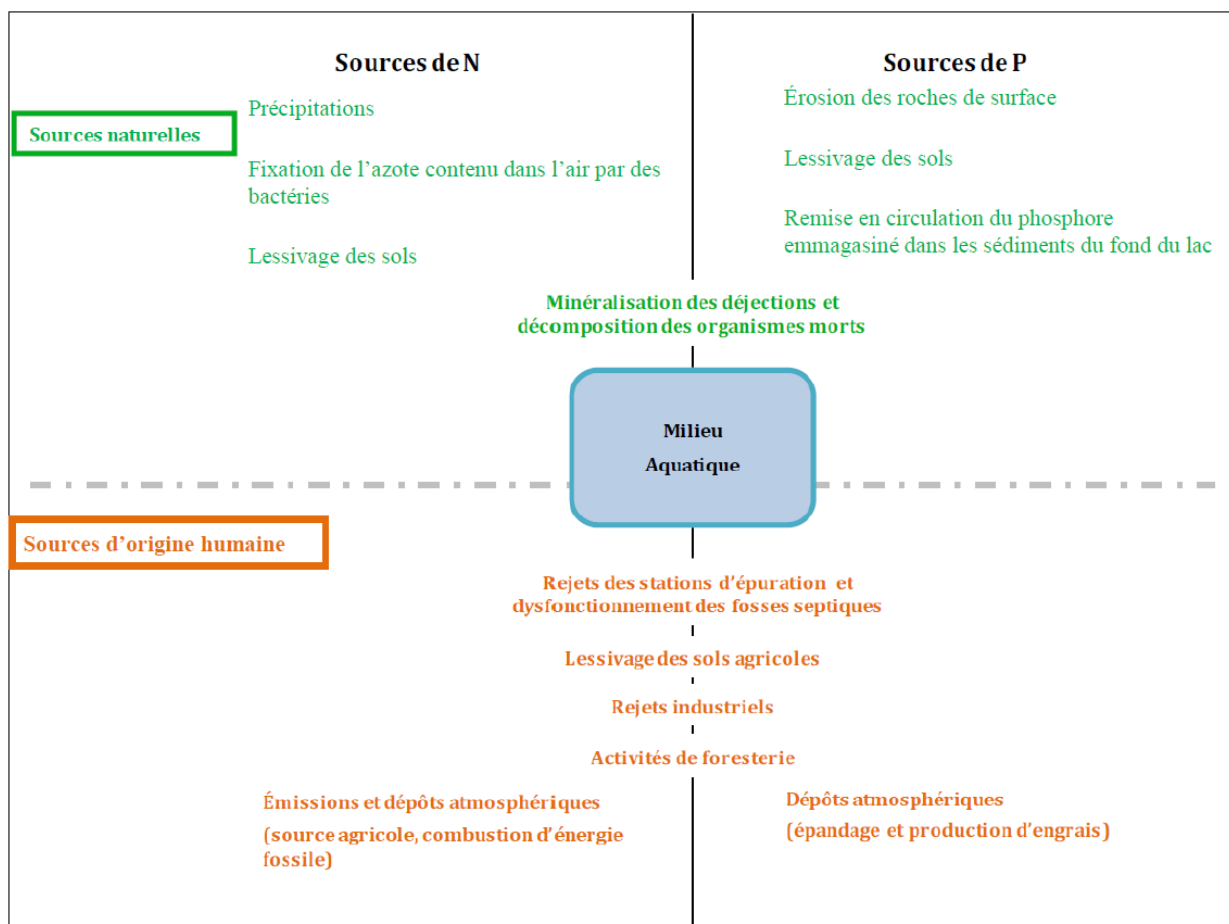
Annexe 2 : Présentation de l'occupation du sol du territoire d'étude (Carte réalisée avec le logiciel Qgis)



Légende

	Bassin Versant de l'Esparron		224 - PAPAM
	Retenue d'Esparron		231 - Prairies
	Cours d'eau		243 - Agriculture avec presence de vegetation
Occupation du sol CRIGE			311 - Forêts de feuillus
	111 - Tissu urbain continu		312 - Forêts de coniferes
	112 - Tissu urbain discontinu		313 - Forêts melangees
	113 - Espaces de bati diffus et autres batis		321 - Pelouses et paturages naturels
	121 - Zones d'activites et equipements		323 - Maquis et garrigues
	122 - Reseaux routier et ferroviaire et espaces associes		324 - Foret et vegetation arbustive en mutation
	141 - Espaces ouverts urbains		332 - Roches et sols nus
	142 - Equipements sportifs et de loisirs		333 - Vegetation clairsemee
	211 - Terres arables autres que serres, et rizieres (hors perimetres d'irrigation)		511 - Cours et voies d'eau
	221 - Vignobles		512 - Plans d'eau
	222 - Arboriculture autre que oliviers		
	223 - Oliveraies		

Annexe 3: Schéma des principales sources naturelles et anthropiques de l'azote et du phosphore en lac (Source : Morin, M., Le Hénaff, A., 2015. Etude diagnostique du lac des Rapides, Mémoire OBV Duplessis)



Annexe 4: Tableau présentant les taux de production d'éléments nutritifs en fonction de l'usage du sol (Benetton, 1984)

Land uses	Nitrogen generation rate (kg/ha/year)	Phosphorus generation rate (kg/ha/year)
Artificial area	10	2
Truck farming	10	1
Vine	5	1
Orchard	10	1
Natural area	0.2	0.1

Annexe 5 : Tableaux présentant le flux d'azote et de phosphore produit par an par type d'occupation du sol du territoire d'étude.

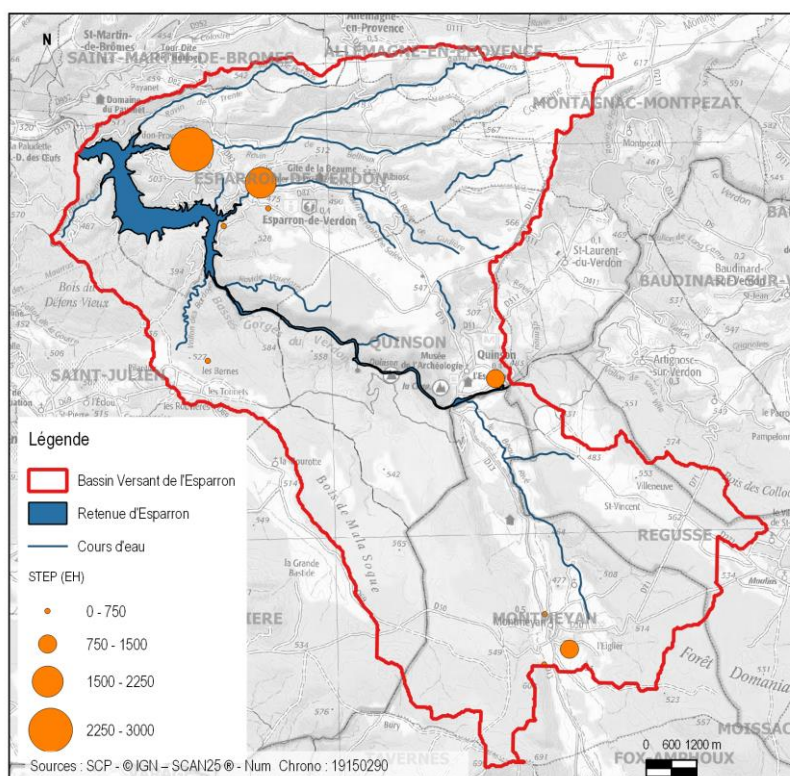
Usages du sol	Désignation	Surface (ha)	Azote produit (kg/an)	Azote total produit par usage de sol (kg/an)
Zones artificielles	Tissu urbain continu	7,28	72,75	4 628,90
	Tissu urbain discontinu	53,94	539,43	
	Espaces de bati diffus et autres batis	264,29	2 642,91	
	Zones d'activités et équipements	45,80	457,95	
	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	56,71	567,06	
	Espaces ouverts urbains	2,30	22,98	
	Équipements sportifs et de loisirs	32,58	325,82	
Exploitations agricoles	Terres arables autres que serres, et rizières (hors périmètres d'irrigation)	1 928,87	19 288,69	26 861,78
	PAPAM	358,44	3 584,36	
	Prairies	397,14	3 971,43	
	Territoires principalement occupés par l'agriculture avec présence de végétation	1,73	17,31	
Vignes	Vignobles	97,98	489,89	489,89
Vergers	Arboriculture autre que oliviers	52,23	522,33	1 065,95
	Oliveraies	54,36	543,63	
Zones naturelles	Forêts de feuillus	5 890,67	1 178,13	2 067,82
	Forêts de conifères	191,01	38,20	
	Forêts mixtes	1 746,99	349,40	
	Pelouses et pâturages naturels	62,94	12,59	
	Maquis et garrigues	371,73	74,35	
	Forêt et végétation arbustive en mutation	2 057,77	411,55	
	Roches et sols nus	3,60	0,72	
	Végétation clairsemée	14,40	2,88	
TOTAL				35 114,34

Usages du sol	Désignation	Surface (ha)	Phosphore produit (kg/an)	Phosphore total produit par usage de sol (kg/an)
Zones artificielles	Tissu urbain continu	7,28	14,55	925,78
	Tissu urbain discontinu	53,94	107,89	
	Espaces de bati diffus et autres batis	264,29	528,58	
	Zones d activites et equipements	45,80	91,59	
	Reseaux routier et ferroviaire et espaces associes	56,71	113,41	
	Espaces ouverts urbains	2,30	4,60	
	Equipements sportifs et de loisirs	32,58	65,16	
Exploitations agricoles	Terres arables autres que serres, et rizieres (hors perimetres d irrigation)	1 928,87	1 928,87	2 686,18
	PAPAM	358,44	358,44	
	Prairies	397,14	397,14	
	Territoires principalement occupes par l agriculture avec presence de vegetation	1,73	1,73	
Vignes	Vignobles	97,98	97,98	97,98
Vergers	Arboriculture autre que oliviers	52,23	52,23	106,60
	Oliveraies	54,36	54,36	
Zones naturelles	Forets de feuillus	5 890,67	589,07	1 033,91
	Forets de coniferes	191,01	19,10	
	Forets melangees	1 746,99	174,70	
	Pelouses et paturages naturels	62,94	6,29	
	Maquis et garrigues	371,73	37,17	
	Foret et vegetation arbustive en mutation	2 057,77	205,78	
	Roches et sols nus	3,60	0,36	
	Vegetation clairsemee	14,40	1,44	
TOTAL				4 850,44

Annexe 6 : Tableau présentant le flux d'azote et phosphore issus du Verdon

Mois	Débit entrant Quinson (m³/s)	Débit entrant Quinson (m³/mois)	Azote (kgN/m³)	Phosphore (kgP/m³) LQ/2	Flux N (kgN/mois)	Flux P (kgP/mois) LQ/2
janv.-16	5,0	13 392 000,0	0,000427	0,000025	5 712,0	334,80
févr.-16	8,0	20 044 800,0	0,000369	0,000025	7 399,9	501,12
mars-16	43,0	115 171 200,0				
avr.-16	29,0	75 168 000,0	0,000368	0,000025	27 698,6	1 879,20
mai-16	8,0	21 427 200,0	0,000430	0,000025	9 206,9	535,68
juin-16	10,0	25 920 000,0	0,000364	0,000025	9 445,9	648,00
juil.-16	16,0	42 854 400,0	0,000370	0,000025	15 839,8	1 071,36
août-16	17,0	45 532 800,0	0,000364	0,000025	16 593,3	1 138,32
sept.-16	12,0	31 104 000,0	0,000364	0,000025	11 335,1	777,60
oct.-16	9,0	24 105 600,0	0,000392	0,000025	9 437,9	602,64
nov.-16	26,0	67 392 000,0	0,000407	0,000025	27 420,2	1 684,80
déc.-16	48,0	128 563 200,0				
janv.-17	31,0	83 030 400,0	0,000417	0,000025	34 645,6	2 075,76
TOTAL	(11 mois mesurés)				174 735,1	11 249,28
TOTAL	(rapporté à 12 mois)				190 620,1	12 271,94

Annexe 7 : Carte de localisation des stations d'épuration sur le territoire d'étude



Annexe 8 : Tableau présentant les systèmes d'assainissement collectifs présents sur le territoire d'étude (Source : <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/>)

Communes	Nom du système	Code station	Type	Sous-type	Composition	Date mise en service	Capacité en m3/j	E.H
Esparron de Verdon	Principale	060904081003	public	domestique	Lit planté de roseau + infiltration	01/05/2011	270	1 800
	La Beaume	060904081002	privé	camping	Lit bactérien faible charge	18/06/1973	12	80
	Grangeonne	4800	privé	camping	DD + LBA + INF	-	-	196
	Le Lac	4800	privé	camping	DEG + DD + LBA + CLA + recirc. + PR + INF	1981	-	3 000
	Le Soleil	4800	privé	camping	2 DD + 2 LBA + PR + INF	1972	-	300
Quinson	Quinson	060904158002	public	domestique	Filtre planté de roseau	08/12/2011	225	1 500
Saint-Julien	Berne	0609083113003	public	domestique	Filtre planté	01/01/1984	75	500
Montmeyan	Principale	060983084002	public	domestique	Lit bactérien à forte charge	01/01/1995	270	1 500
	Raiola loisir	0	privé	camping	-	-	-	-
	SCI de l'Eouvière	0	privé	camping	-	-	-	-
TOTAL							852	8 876

Annexe 9 : Tableau présentant Répartition de la population sur l'année sur les communes du territoire d'étude (Sources : Insee, 2017 : Rapports sur le prix et la qualité du service de l'eau potable et de l'assainissement collectif et non collectif (RPOS), 2015

Communes	Population permanente (Insee, 2017)	Population estivale (capacité d'hébergement)	Population totale	Population non raccordée	Population raccordée
Esparron-de-Verdon	430	2 500	2 930	980	1 950
Quinson	453	1 320	1 773	123	1 650
Montmeyan	583	1 100	1 683	0	1 683
Saint-Julien	150	200	350	-	350

Annexe 10 : Tableau présentant les apports issus des systèmes d'assainissement

Apports en nutriments		
Population permanente		
	Azote produit kg/personne/an	Phosphore produit kg/personne/an
raccordé	8 080	808
Population estivale (présente 1/4 de l'année: juin à septembre)		
	Azote produit kg/personne/an	Phosphore produit kg/personne/an
raccordé	5 021,25	502,13
non raccordé	1 792,38	206,81
TOTAL	14 893,63	1 516,94

Annexe 11 : Tableau présentant la perte de charge en nutriment par le Canal Mixte

Mois	Débit sortant Boute (m ³ /s)	Débit sortant Bourte (m ³ /mois)	Flux d'azote(en kg/mois)	Flux de phosphore (en kg/mois)
janv.-16	3,40	9 100 000,0	4 193,68	227,50
févr.-16	3,71	16 816 800,0	7 730,94	420,42
mars-16	3,55	108 620 800,0	-	
avr.-16	6,34	68 270 000,0	25 773,41	1 706,75
mai-16	5,77	18 128 400,0	6 606,44	453,21
juin-16	6,88	23 014 000,0	8 386,88	575,35
juil.-16	9,07	35 003 600,0	12 756,19	875,09
août-16	9,28	38 242 000,0	13 936,34	956,05
sept.-16	7,02	20 782 000,0	7 573,48	519,55
oct.-16	5,75	20 756 800,0	7 564,30	518,92
nov.-16	2,62	43 088 000,0	18 076,35	1 077,20
déc.-16	3,77	125 271 200,0	-	
janv.-17	4,82	79 867 000,0	31 323,77	1 996,68
TOTAL	(11 mois mesurés)		143 921,77	9 326,72
TOTAL	(rapporté à 12 mois)		157 005,57	10 174,60

Annexe 12 : Espèces de macrophytes en présence dans la retenue d'Esparron

Potamogeton pectinatus :

Le potamogeton pectinatus est une hydrophyte fixée appartenant à la Classe des Monocotylédones. Elle possède une aire de répartition très large. Elle peut coloniser une très vaste gamme de milieux de qualités très différentes sur le plan trophique ; en effet, on la rencontre aussi bien en milieu oligotrophe qu'en milieu eutrophe. Elle s'adapte à une très grande variété de conditions de courant, de turbidité ou de substrat. Elle est capable de se développer jusqu'à plus de 10 m de profondeur avec un optimum entre 7 cm et 6 m. C'est une phanérogame (plante à fleurs) de très grande plasticité morphologique avec des feuilles très allongées et présentant une grande diversité de modes de ramification.



Myriophyllum sp.

Le myriophyllum est une hydrophyte fixée à feuilles submergées de la Classe des Dicotylédones. C'est une espèce pérenne, rhizomateuse à enracinement plus ou moins superficiel sur de nombreux types de substrats.

Elle est caractéristique des milieux stagnants pouvant être profonds à faibles courants. Elle colonise des eaux alcalines, bien minéralisées, méso-eutrophes à eutrophes, de préférence claires. Elle possède une photosynthèse très efficace, qui la rend très compétitive dans l'occupation de l'espace par rapport à d'autres espèces de macrophytes.



Characées

Les Characées sont des macro-algues appartenant à l'ordre des Charales. Elles se développent dans les eaux douces ou très légèrement saumâtres, où elles forment des herbiers souvent mono spécifiques et denses. Ce sont des espèces pionnières qui peuvent recouvrir d'importantes surfaces.

On les retrouve dans les eaux claires et stagnantes ou à très faible courant. Ce sont des plantes caractéristiques de milieux faiblement à moyennement riches en éléments nutritifs, on les considère comme un bon bioindicateur de qualité de l'eau du point de vue de l'oligotrophie et de l'absence de turbidité.

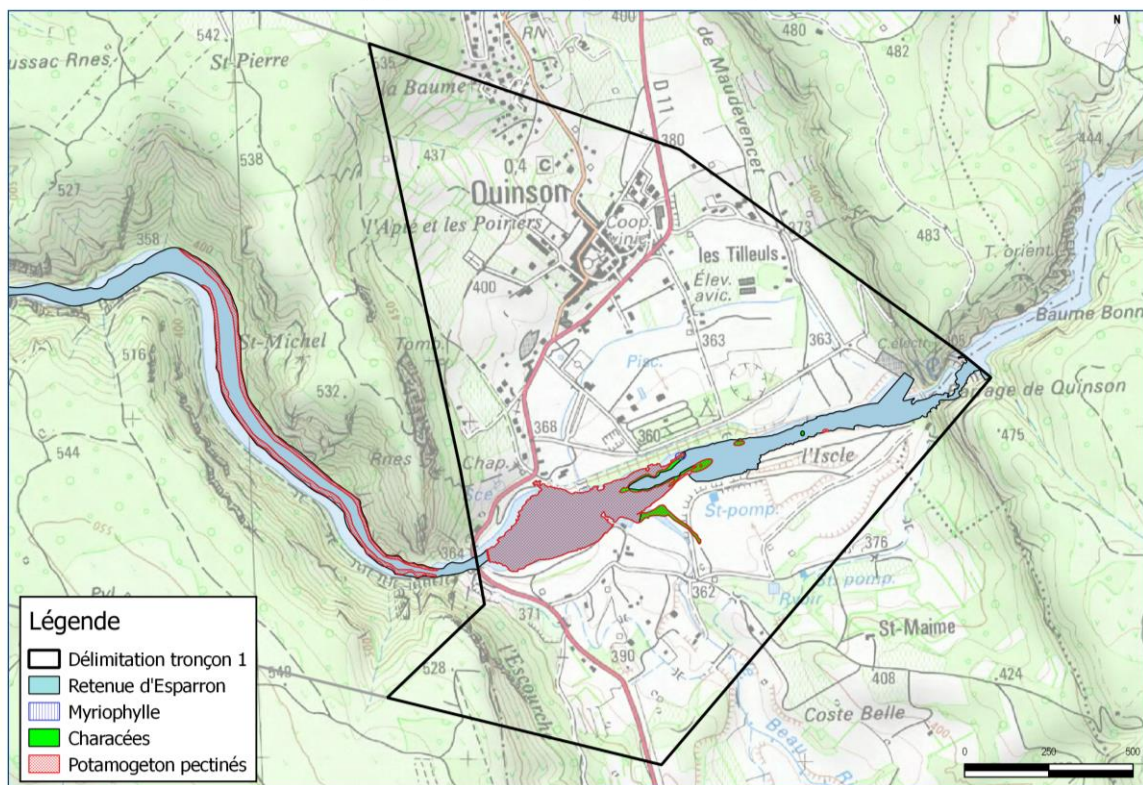


Annexe 13 : Tableau présentant la surface occupée par les herbiers dans la retenue d'Esparron

Surface par type d'herbier (ha)			
Myriophylles	Potamogeton	Characées	TOTAL
1,20	12,81	19,35	33,36

Annexe 14 : Exemple de cartographie des herbiers sur la zone amont du site d'étude (réalisée avec le logiciel Qgis)

Cartographie des herbiers - Tronçon 1 - Retenue de Quinson



Sources : SCP - © IGN - SCAN25 © - Num_Chrono : 19150290

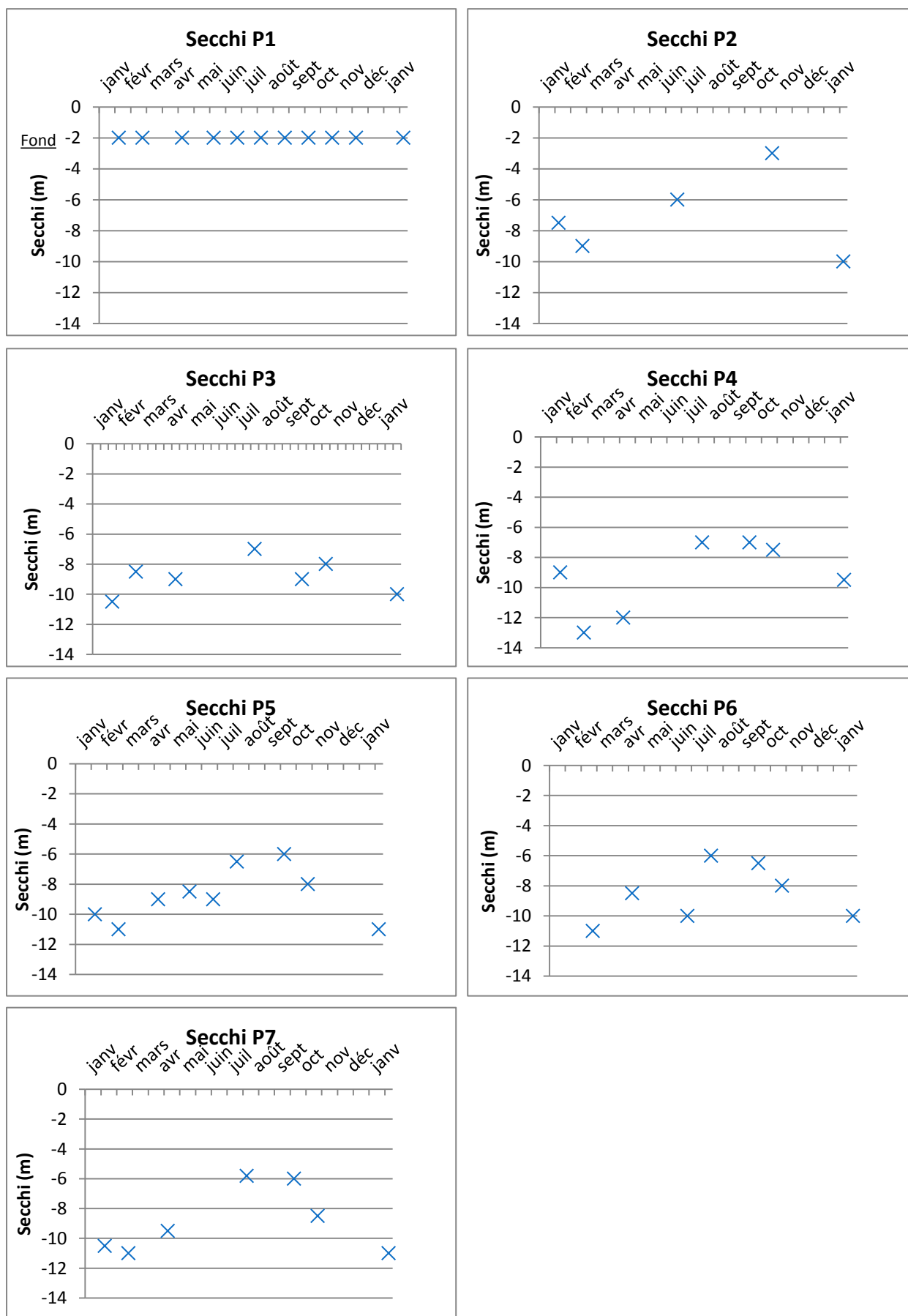
Annexe 15 :**Planche 1 : Profondeur de Secchi**

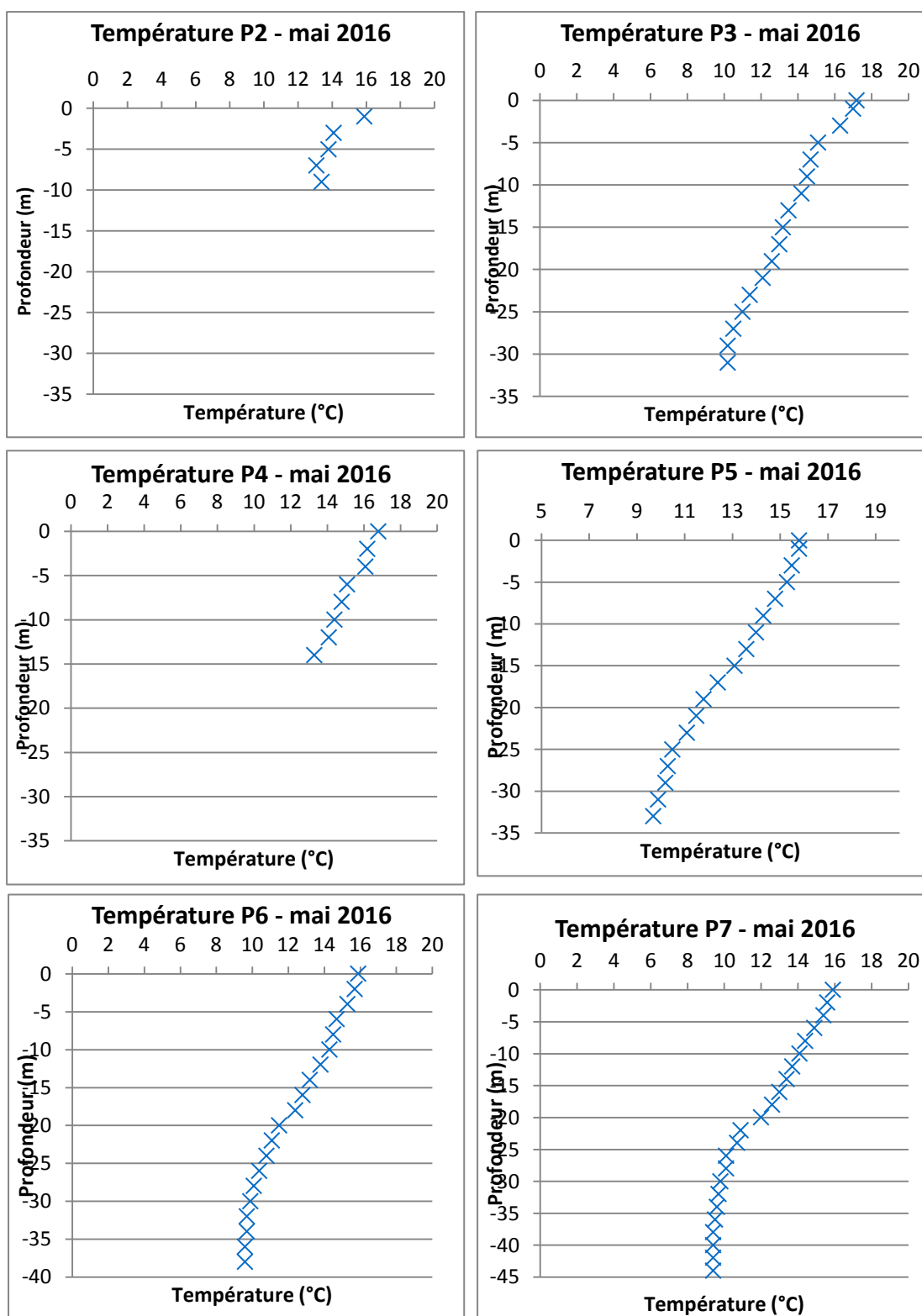
Planche 2a: Température – Profil stratigraphique mai 2016


Planche 2b: Température – Profil stratigraphique juin 2016

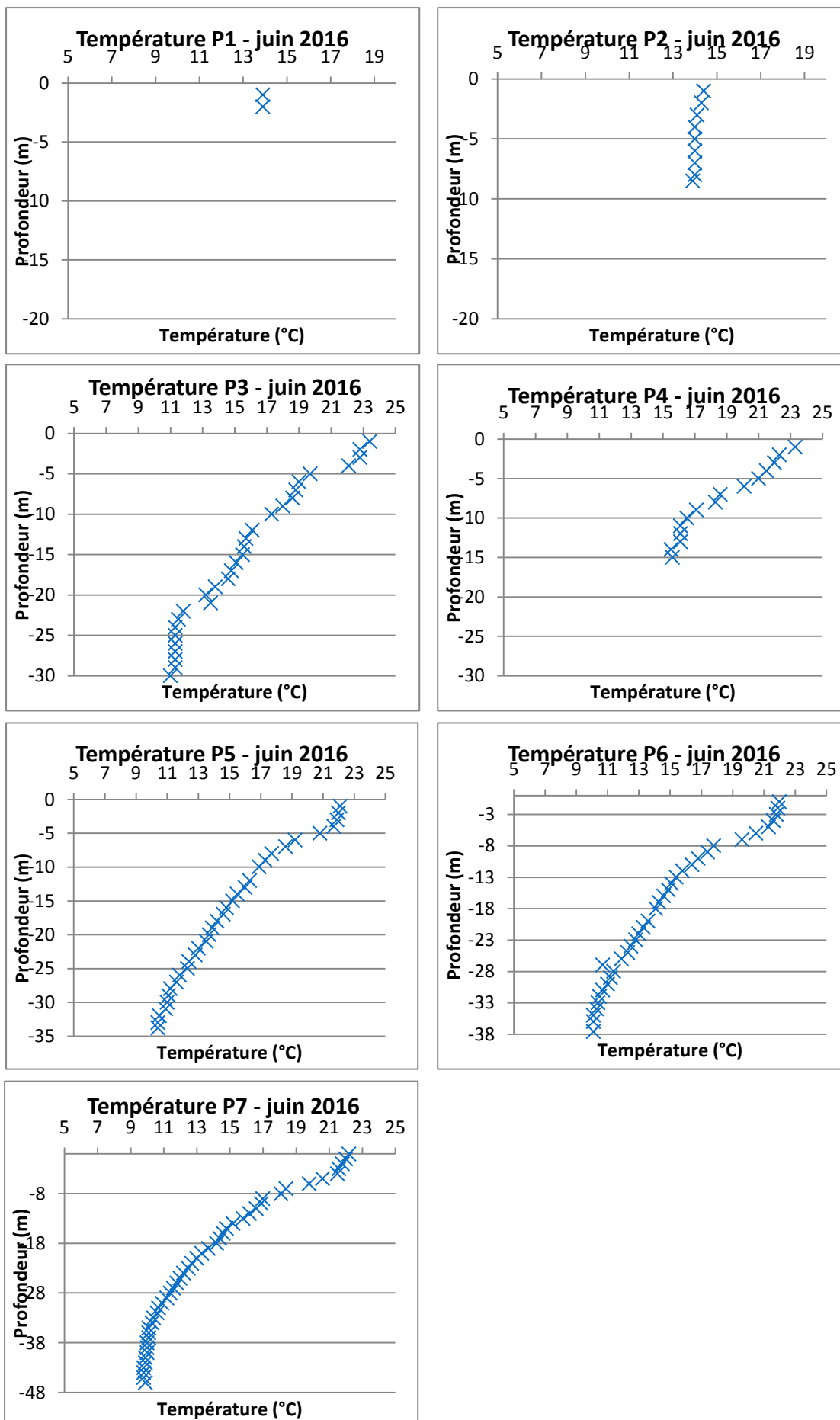


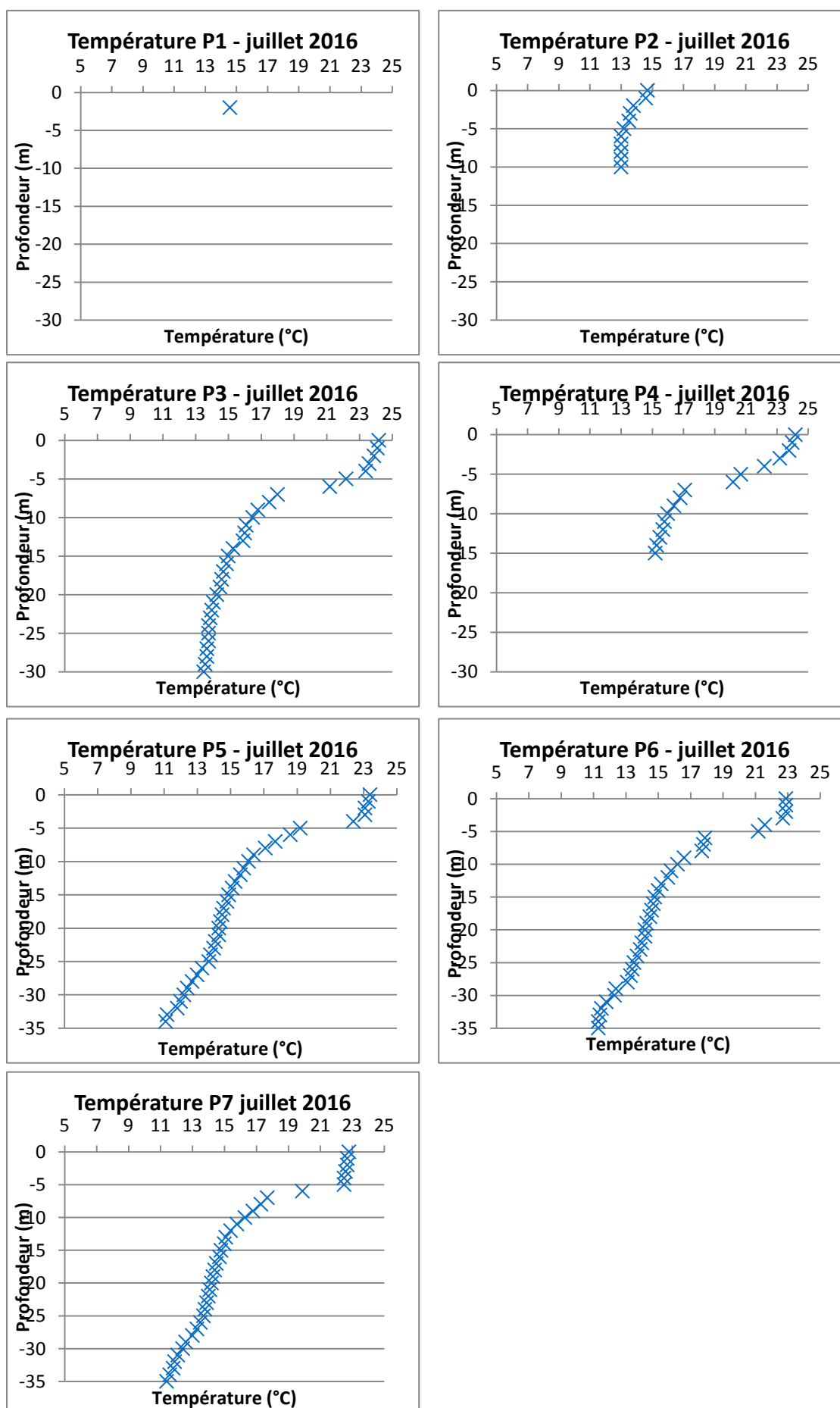
Planche 2c:Température – Profil stratigraphique juillet 2016


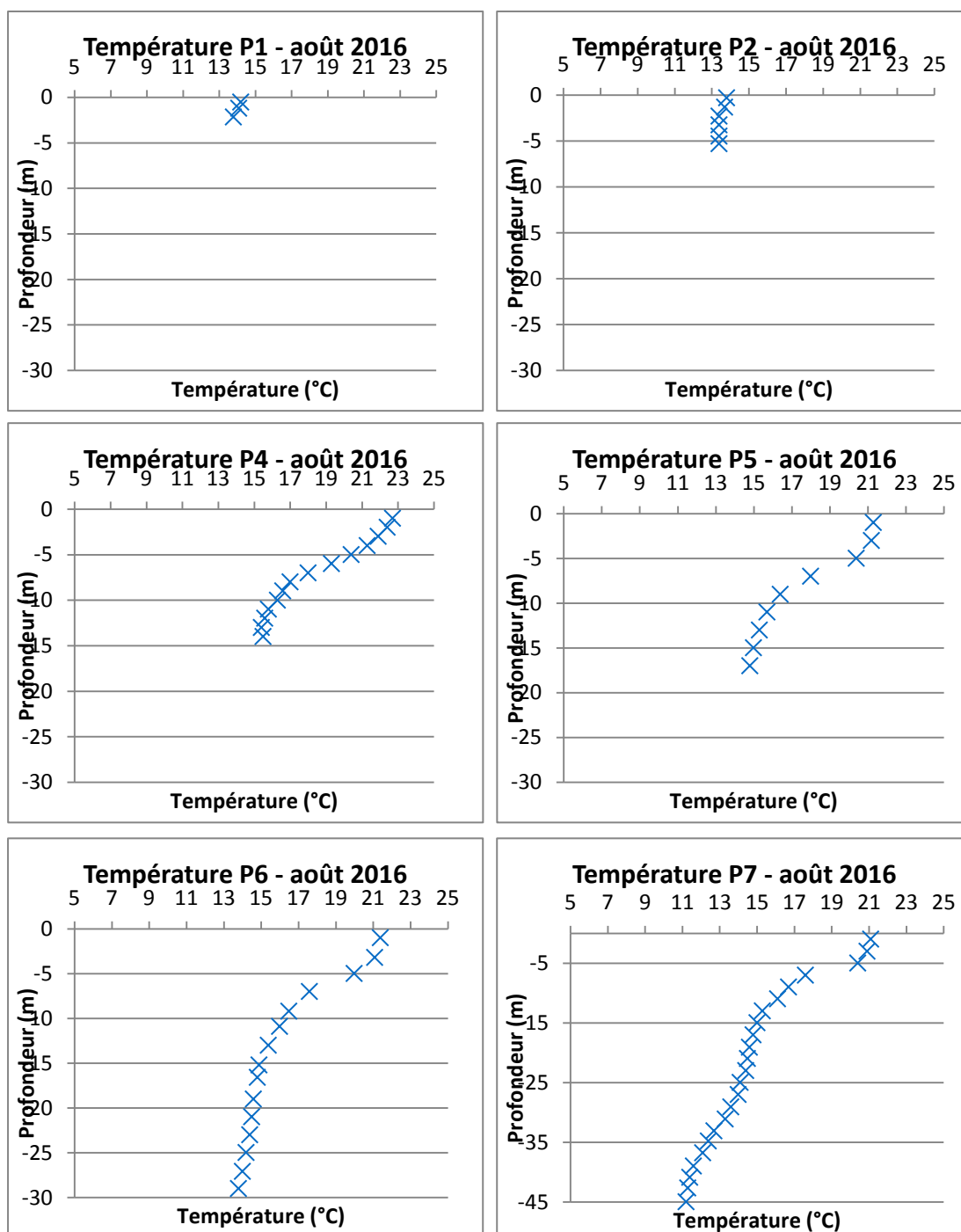
Planche 2d:Température – Profil stratigraphique août 2016


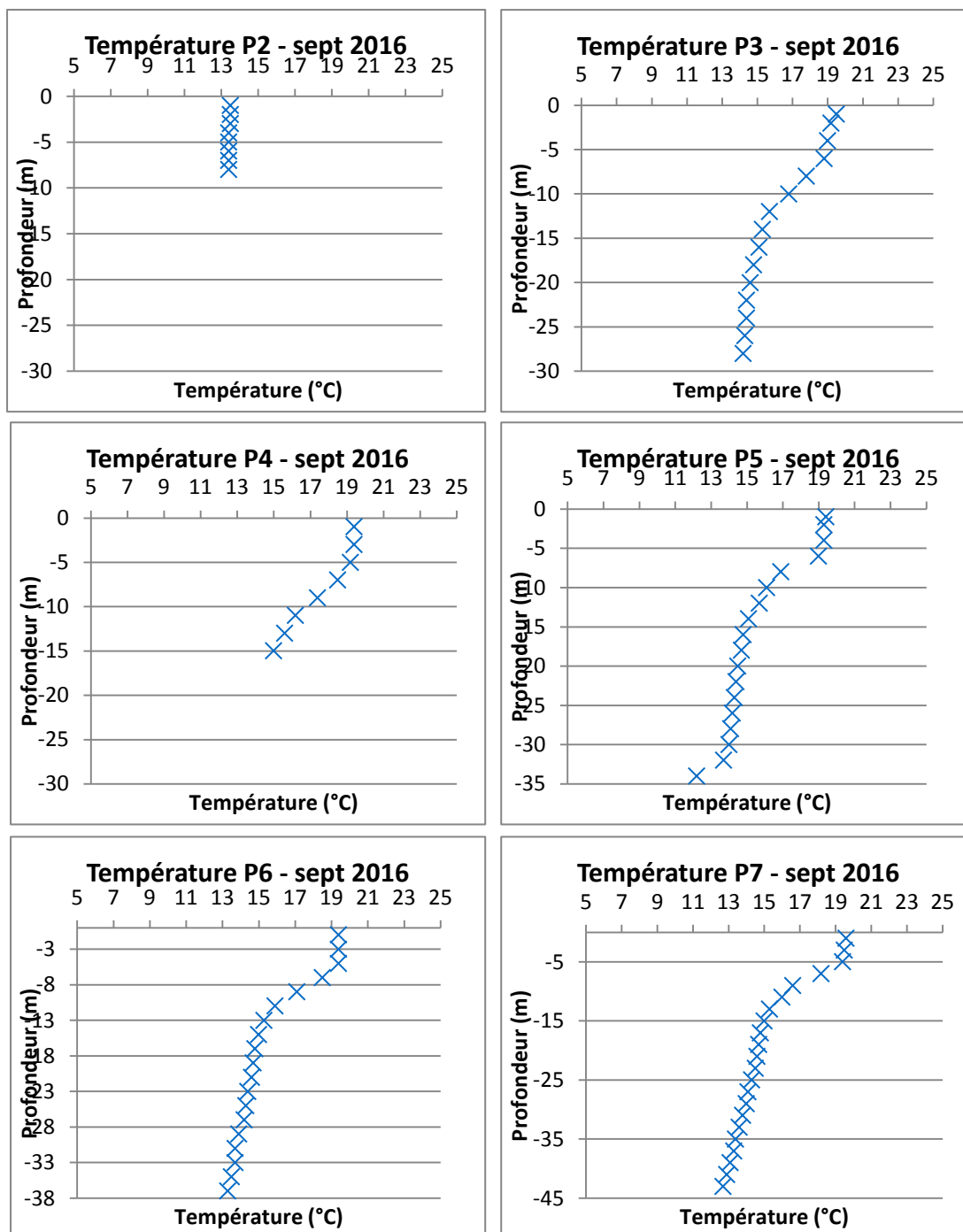
Planche 2e:Température – Profil stratigraphique septembre 2016


Planche 2f: Température – Profil stratigraphique octobre 2016

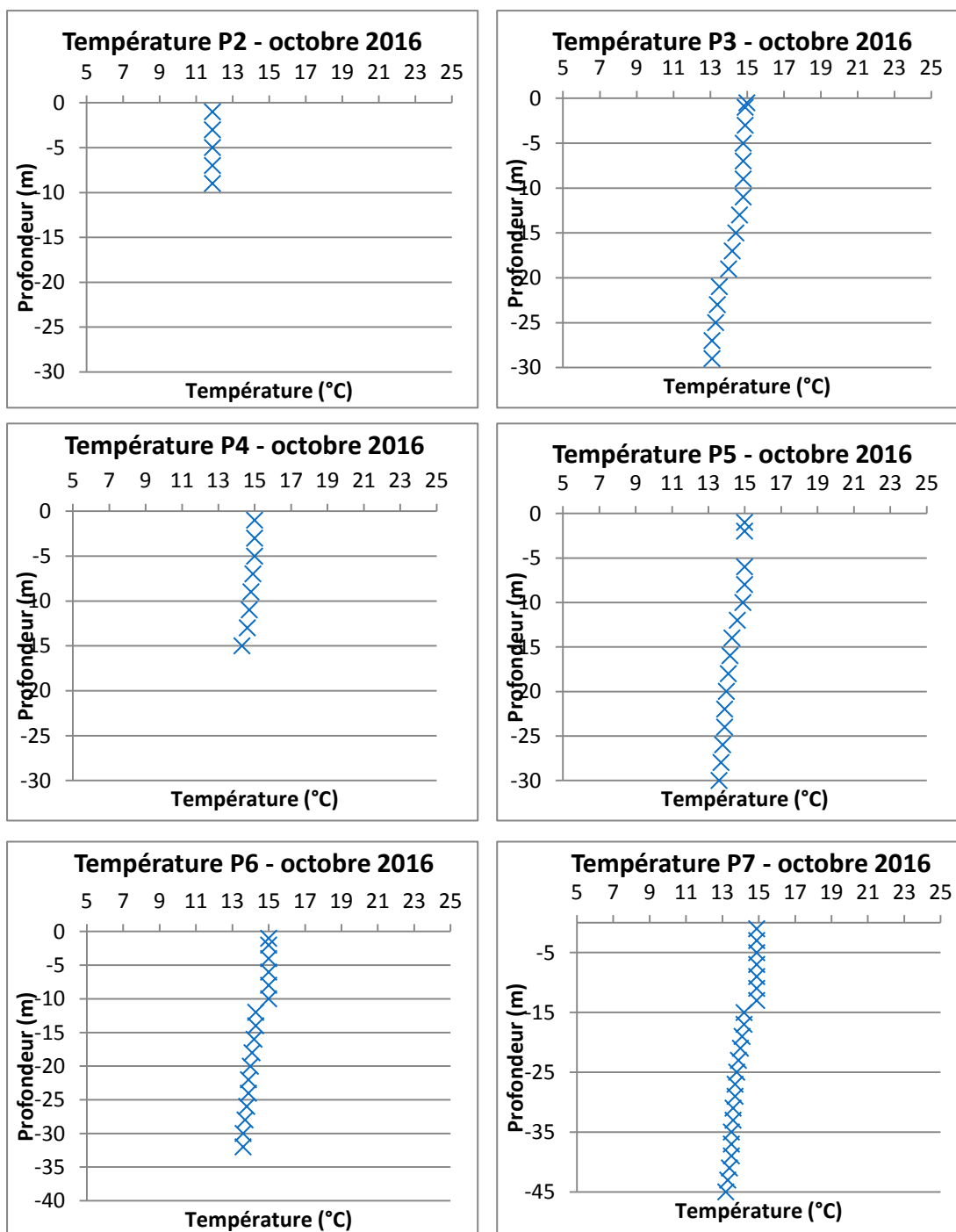


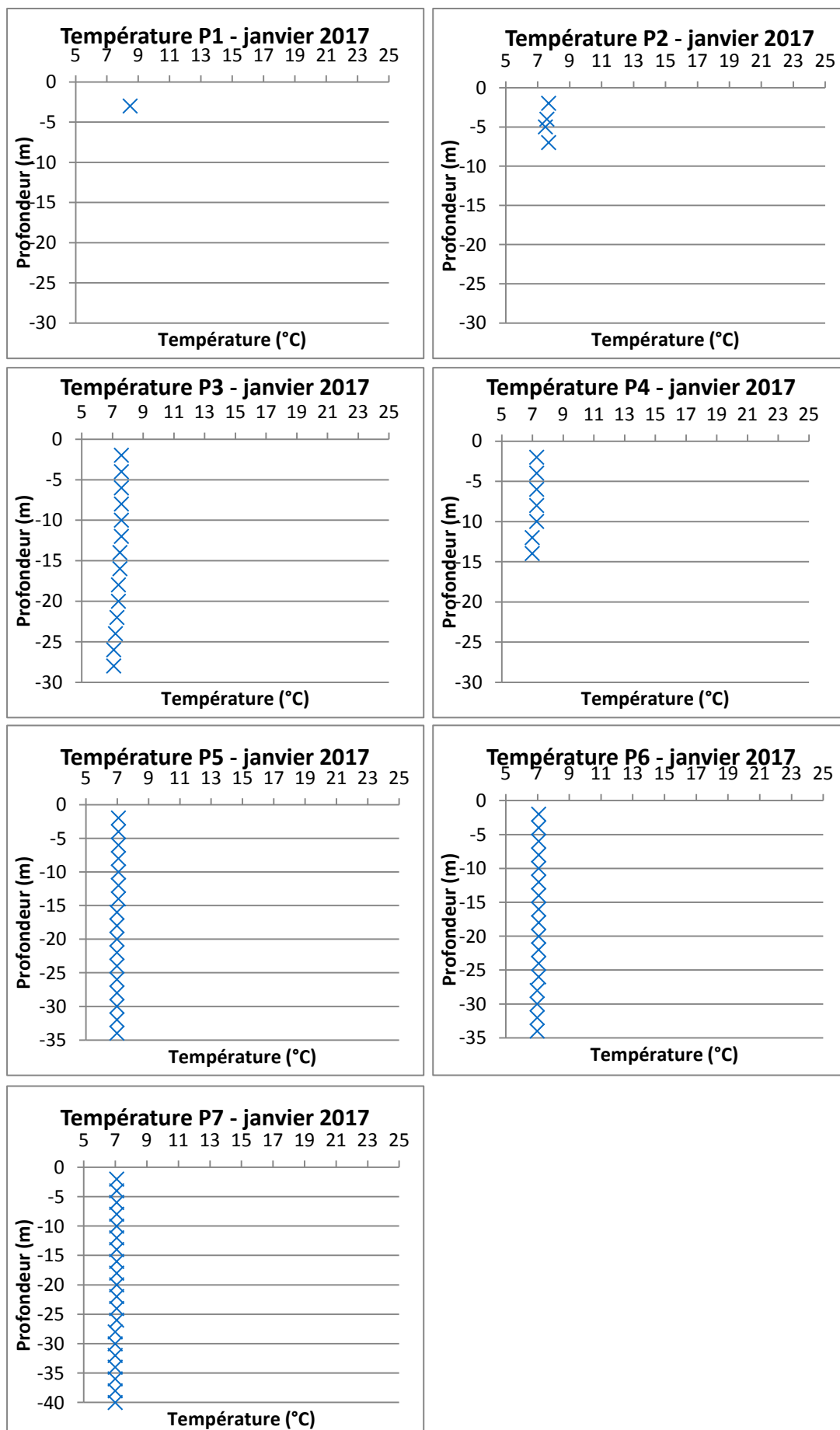
Planche 2g:Température – Profil stratigraphique janvier 2017


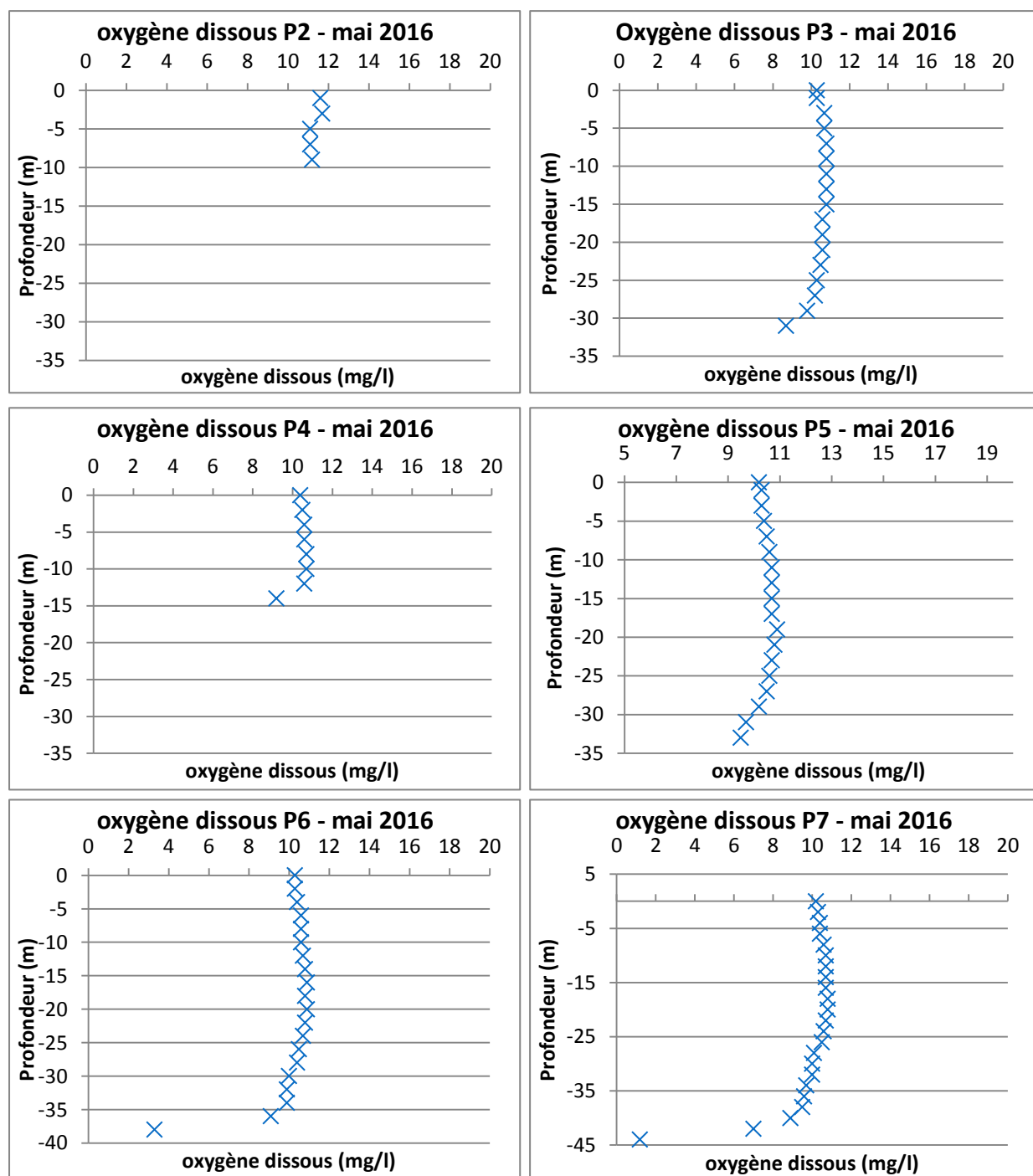
Planche 3a : Oxygène – Profil mai 2016


Planche 3c : Oxygène – Profil juin 2016

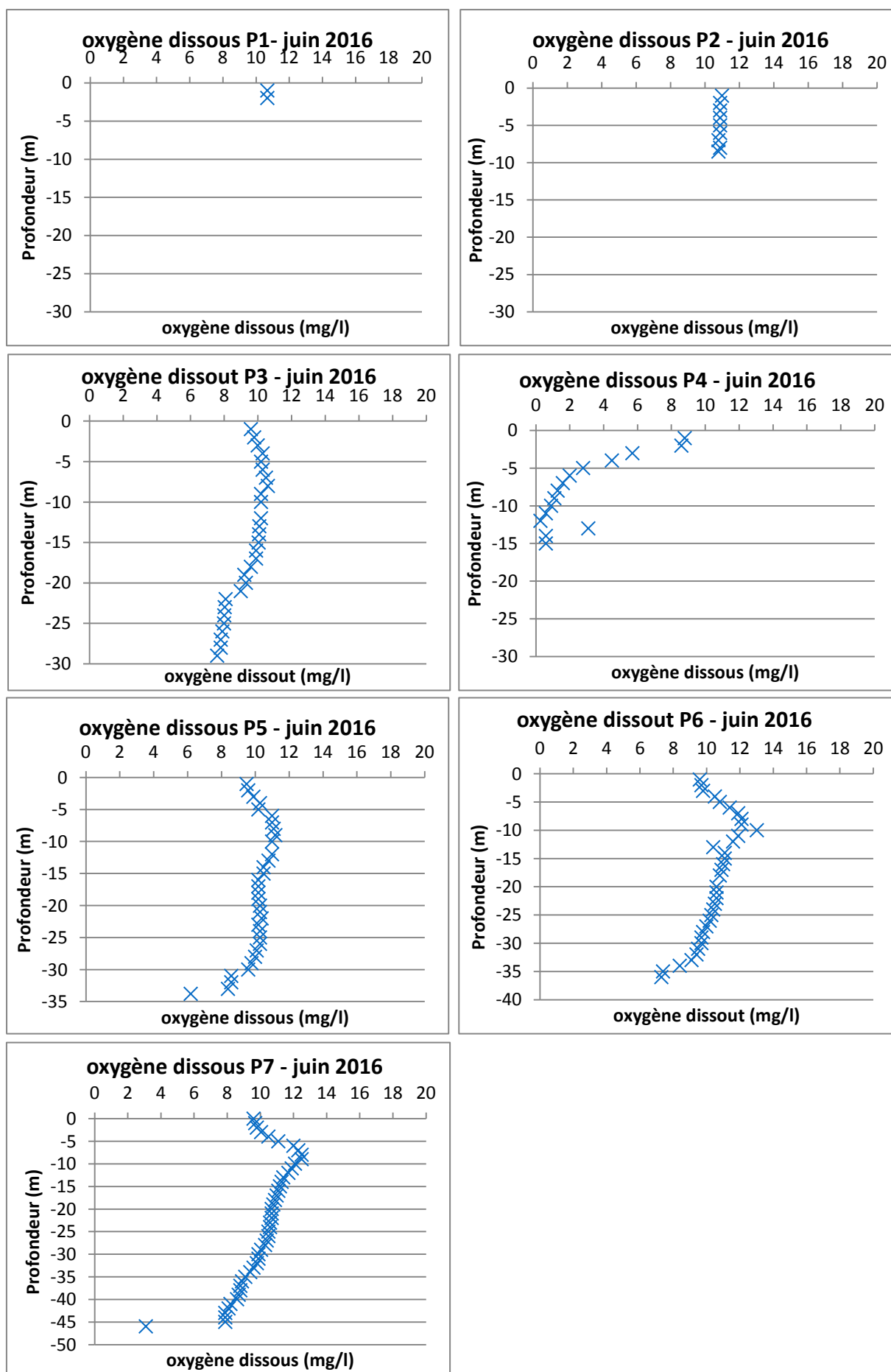


Planche 3d : Oxygène – Profil juillet 2016

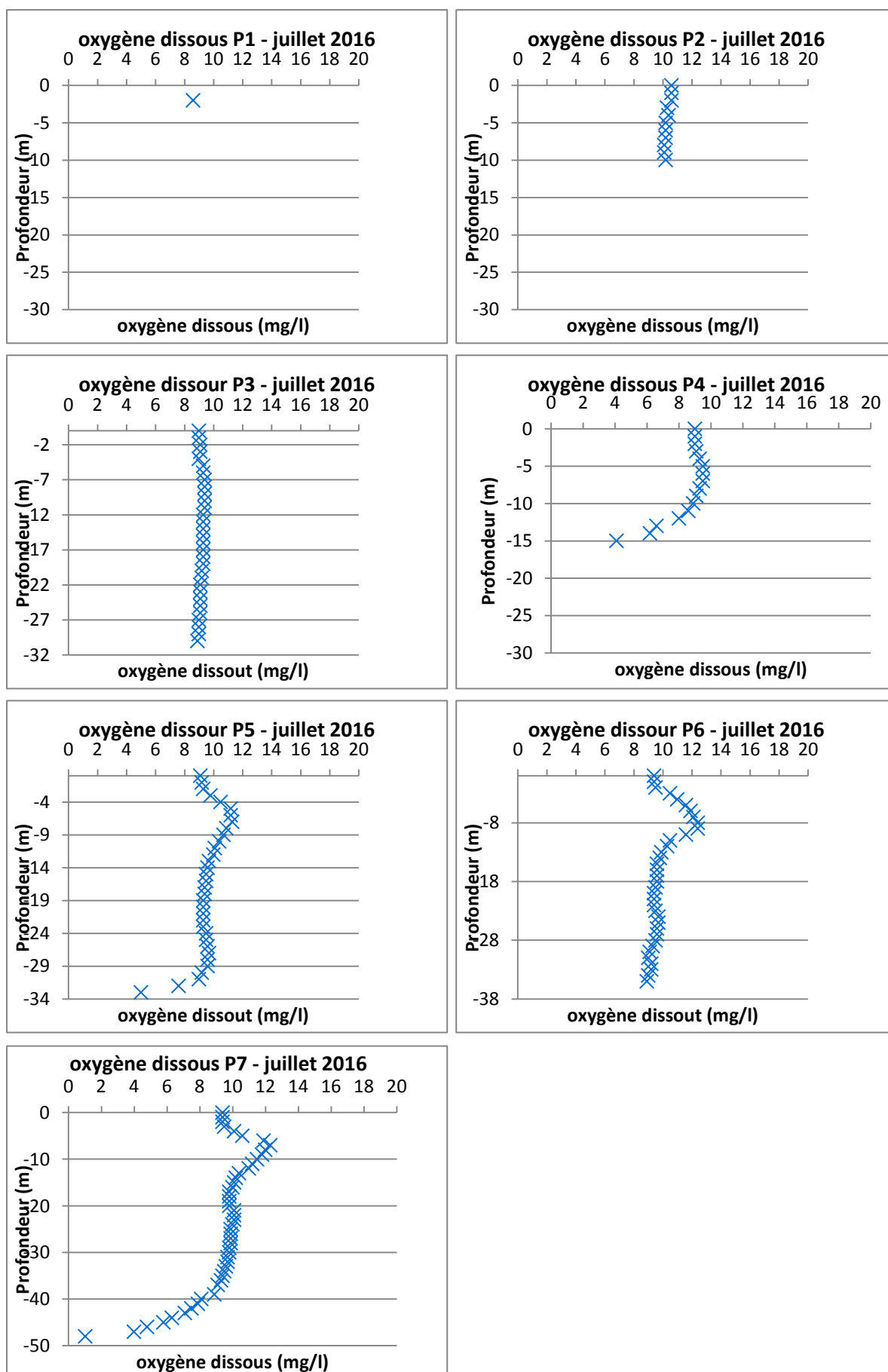


Planche 3e : Oxygène – Profil août 2016

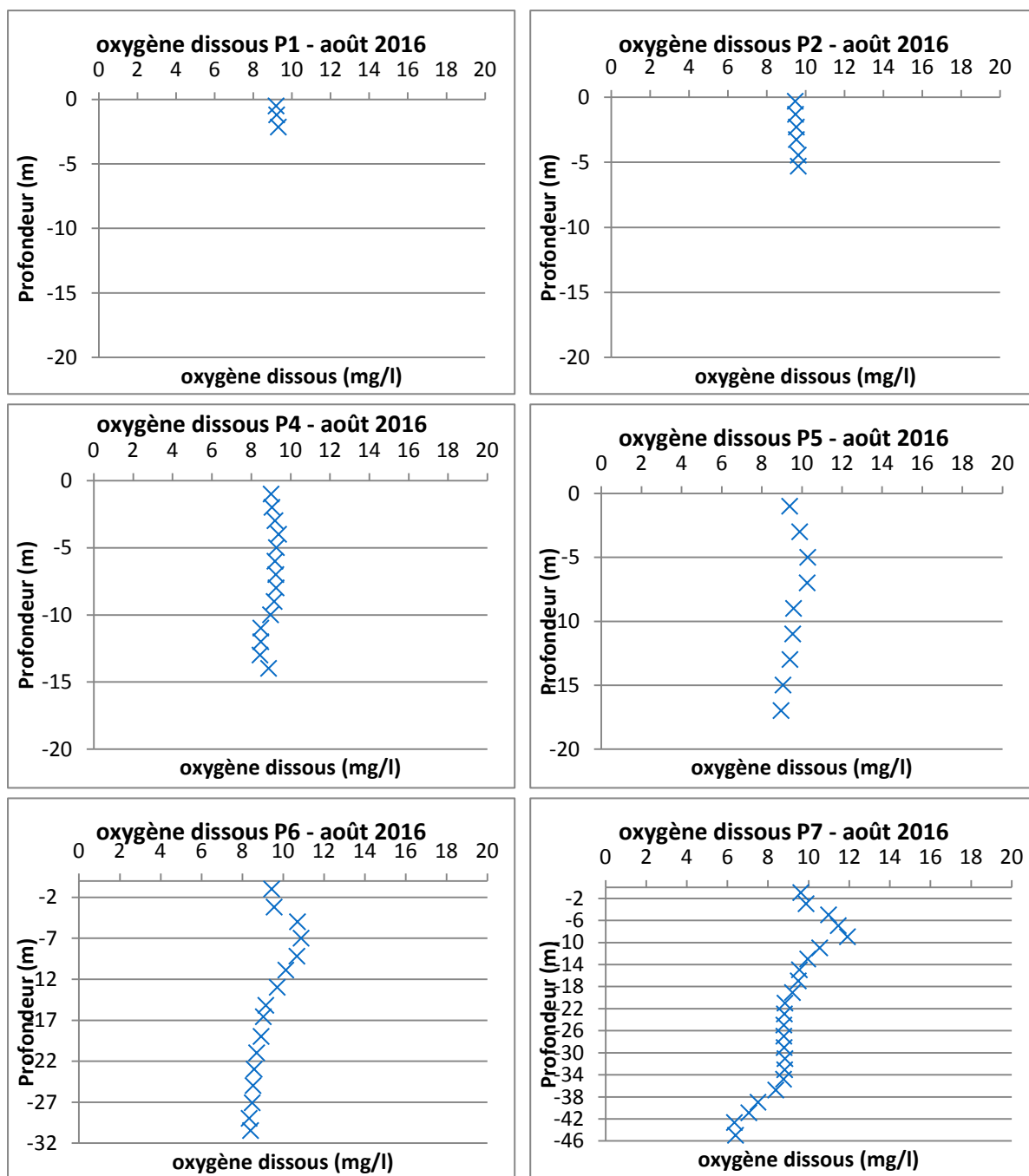


Planche 3f : Oxygène – Profil septembre 2016

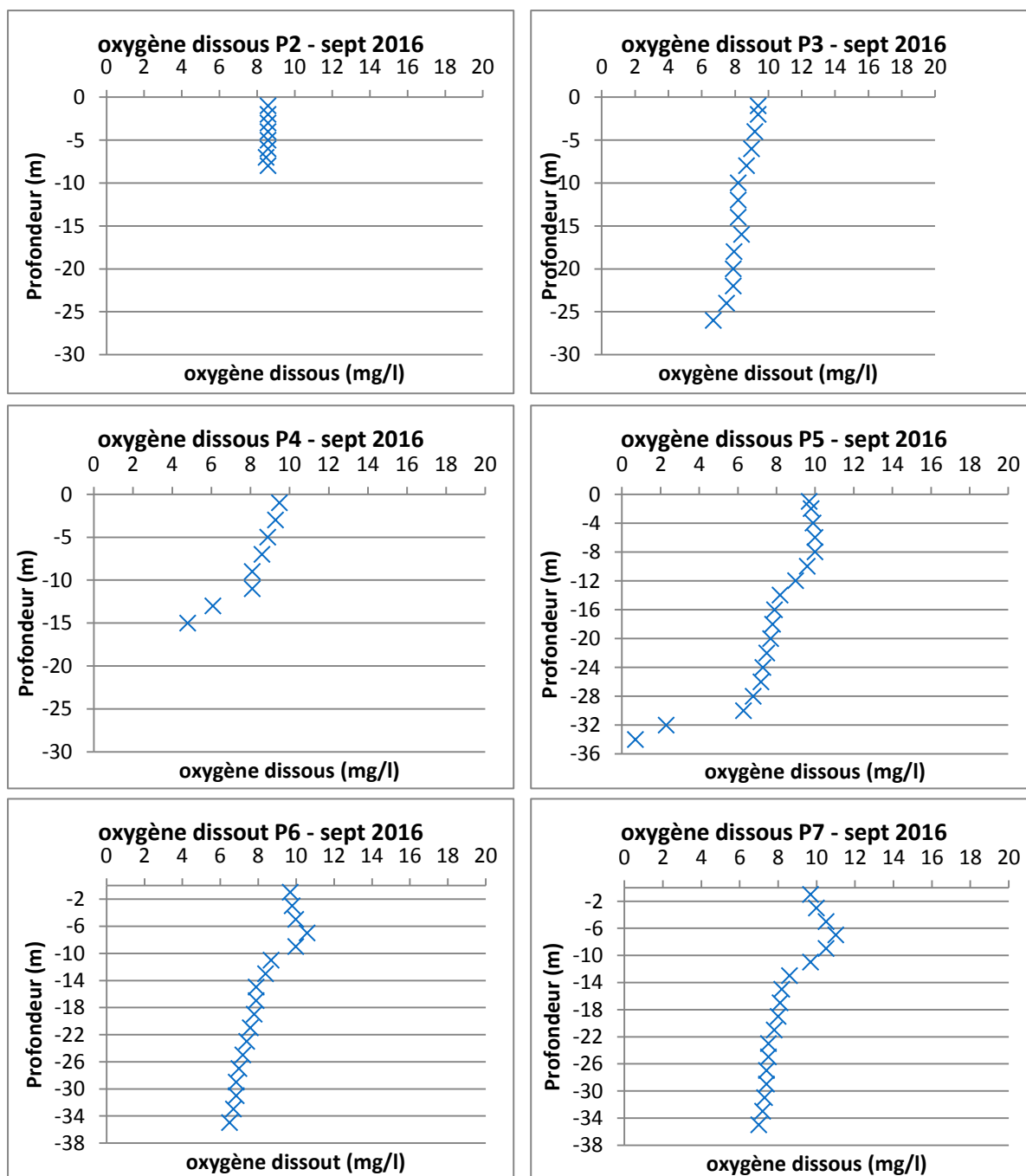


Planche 3g : Oxygène – Profil octobre 2016

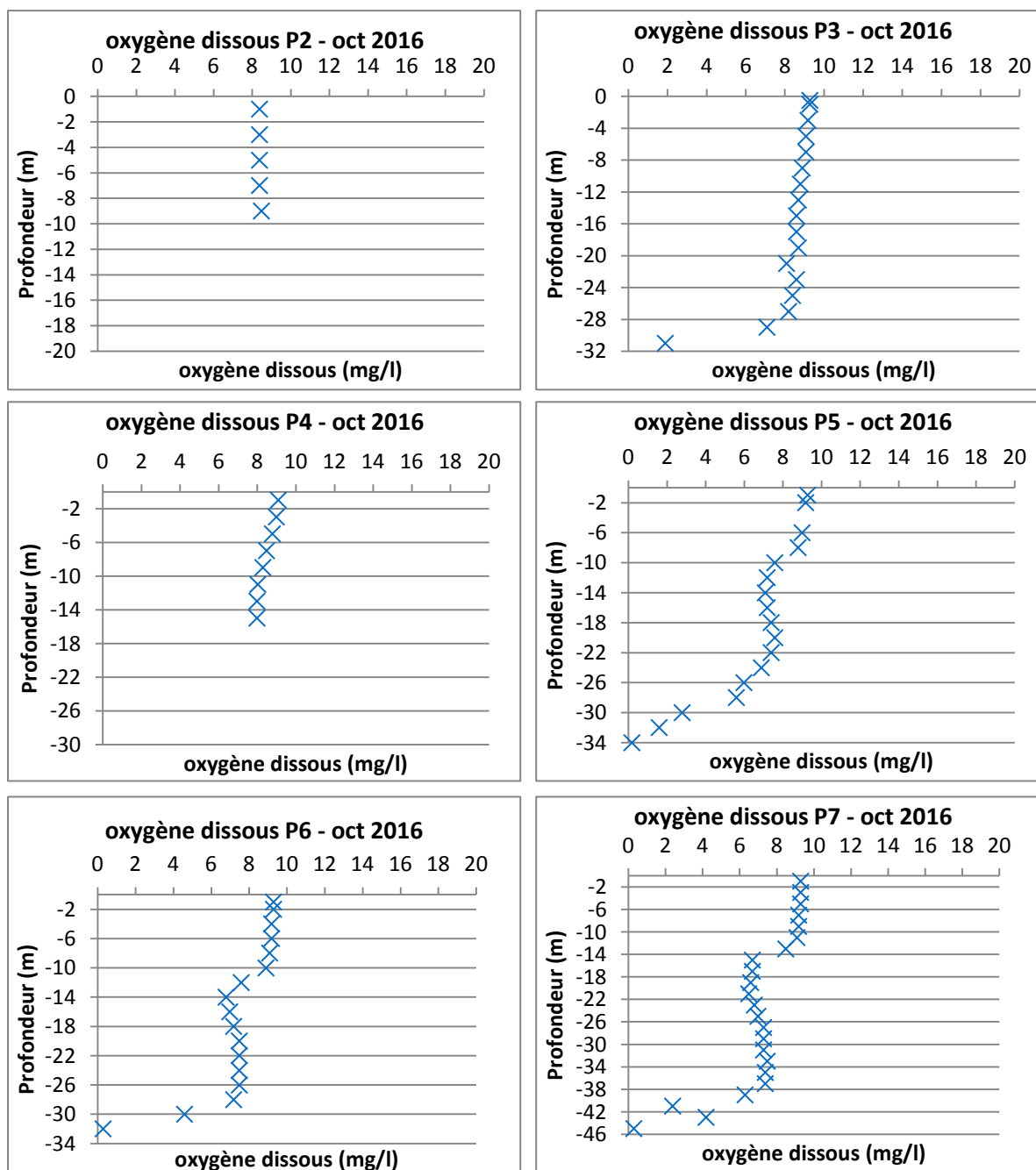


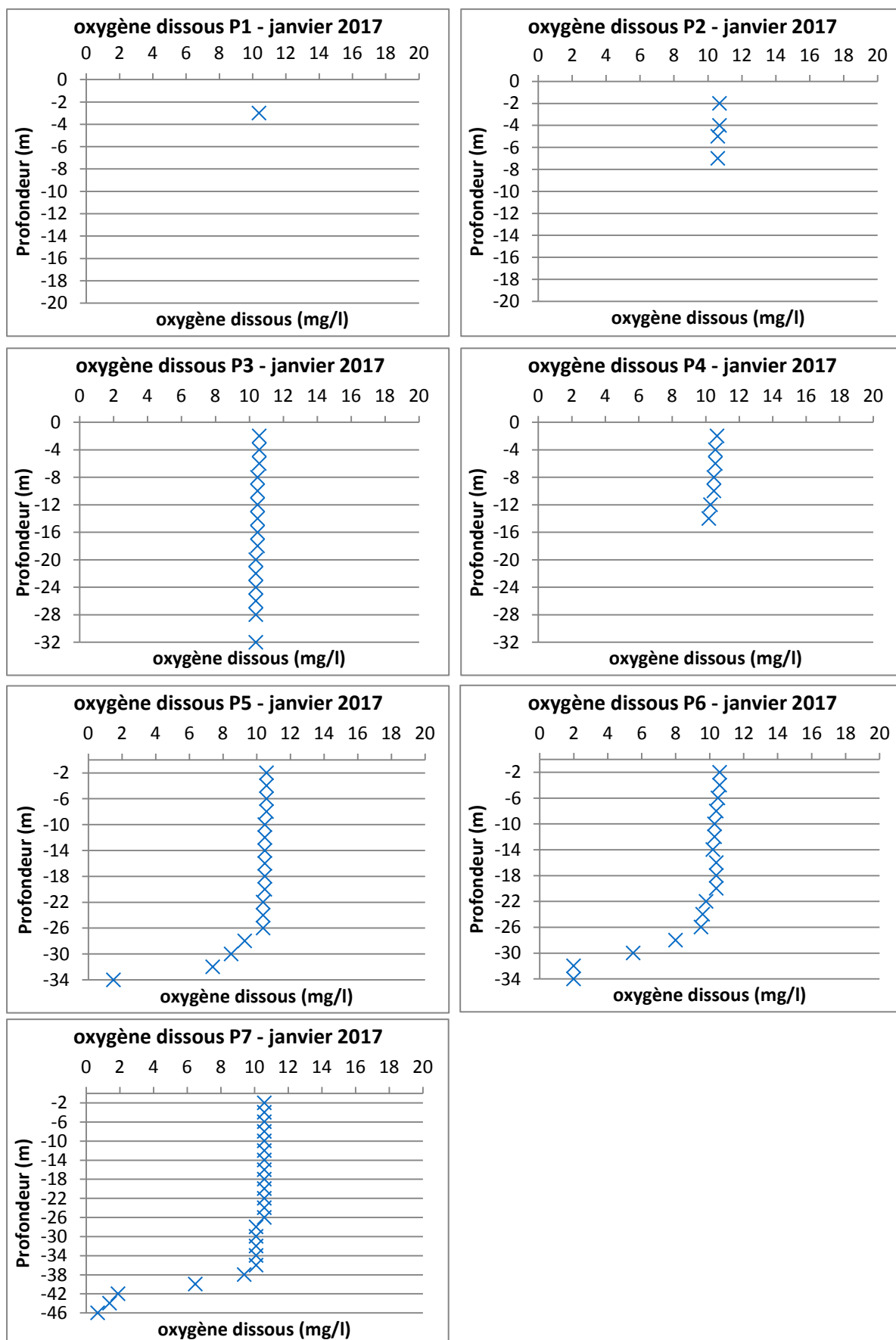
Planche 3h : Oxygène – Profil janvier 2017


Planche 4 : Nitrates

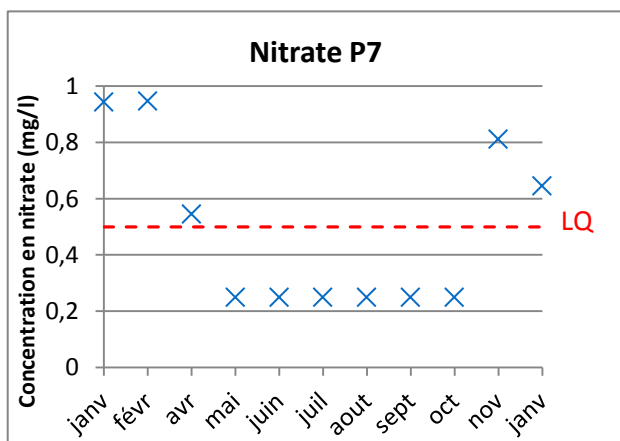
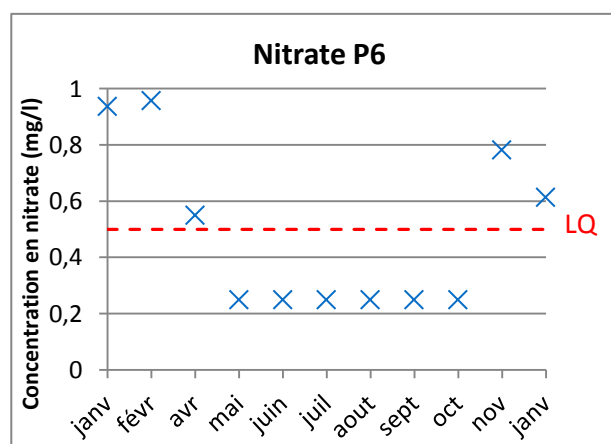
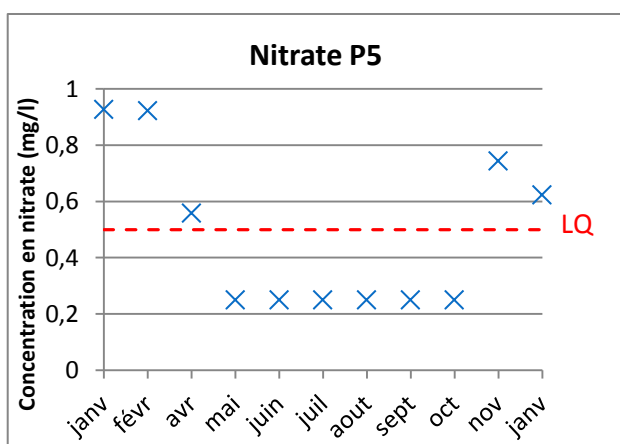
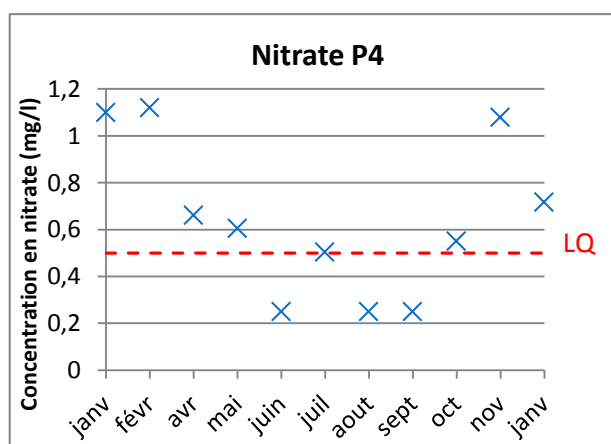
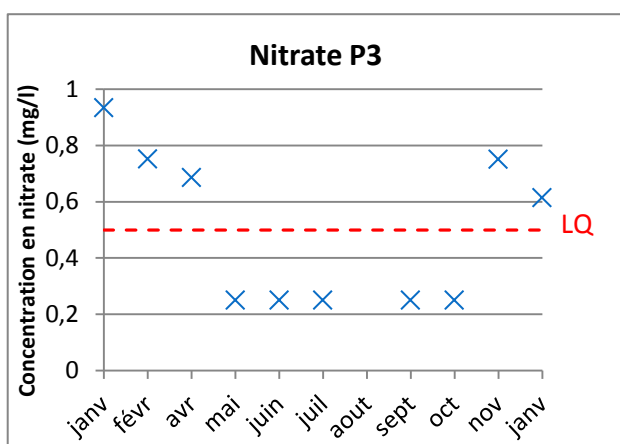
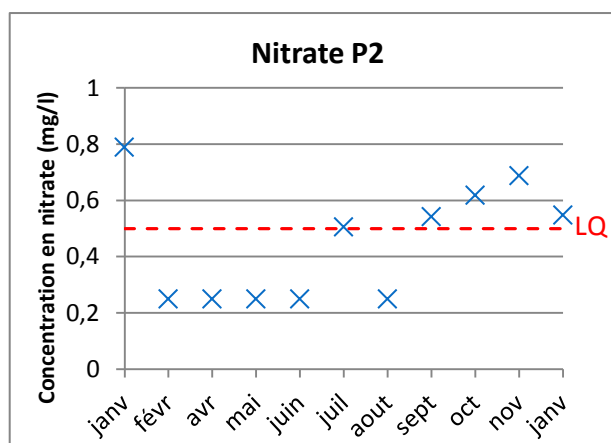
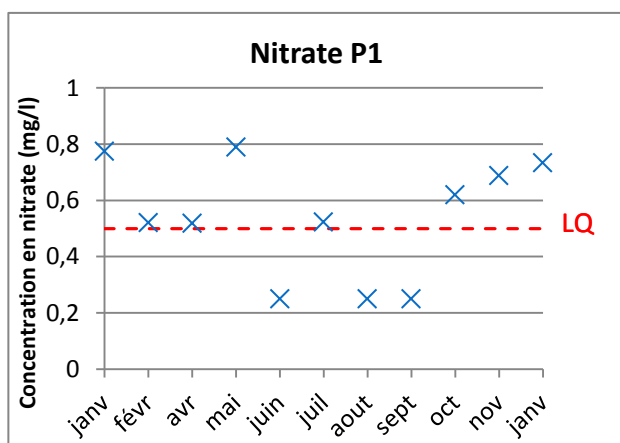
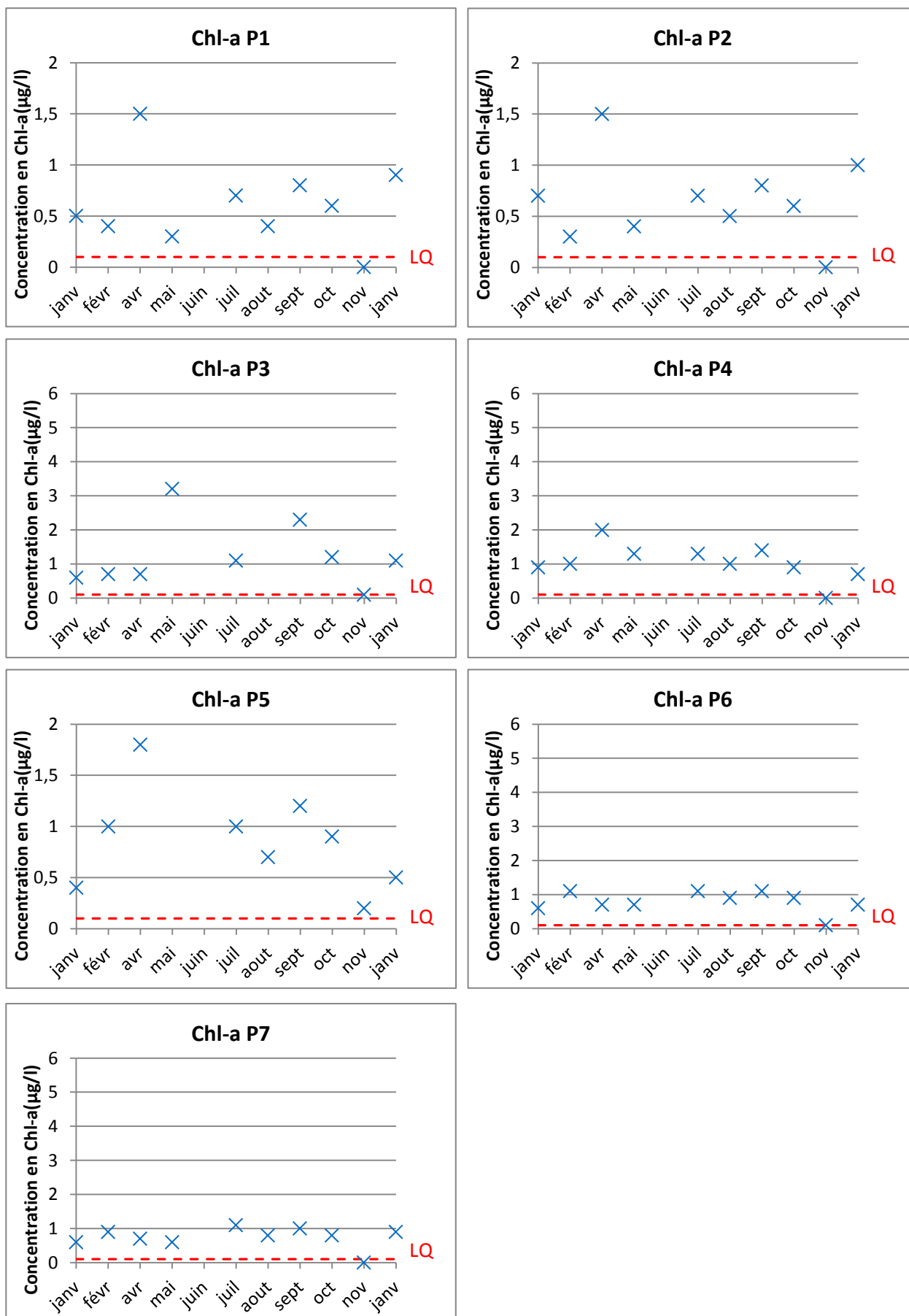


Planche 5 : Chl-a



Annexe 16 : Méthodologie DCE appliquée à la campagne de mesure

Planche 1 : Nitrate

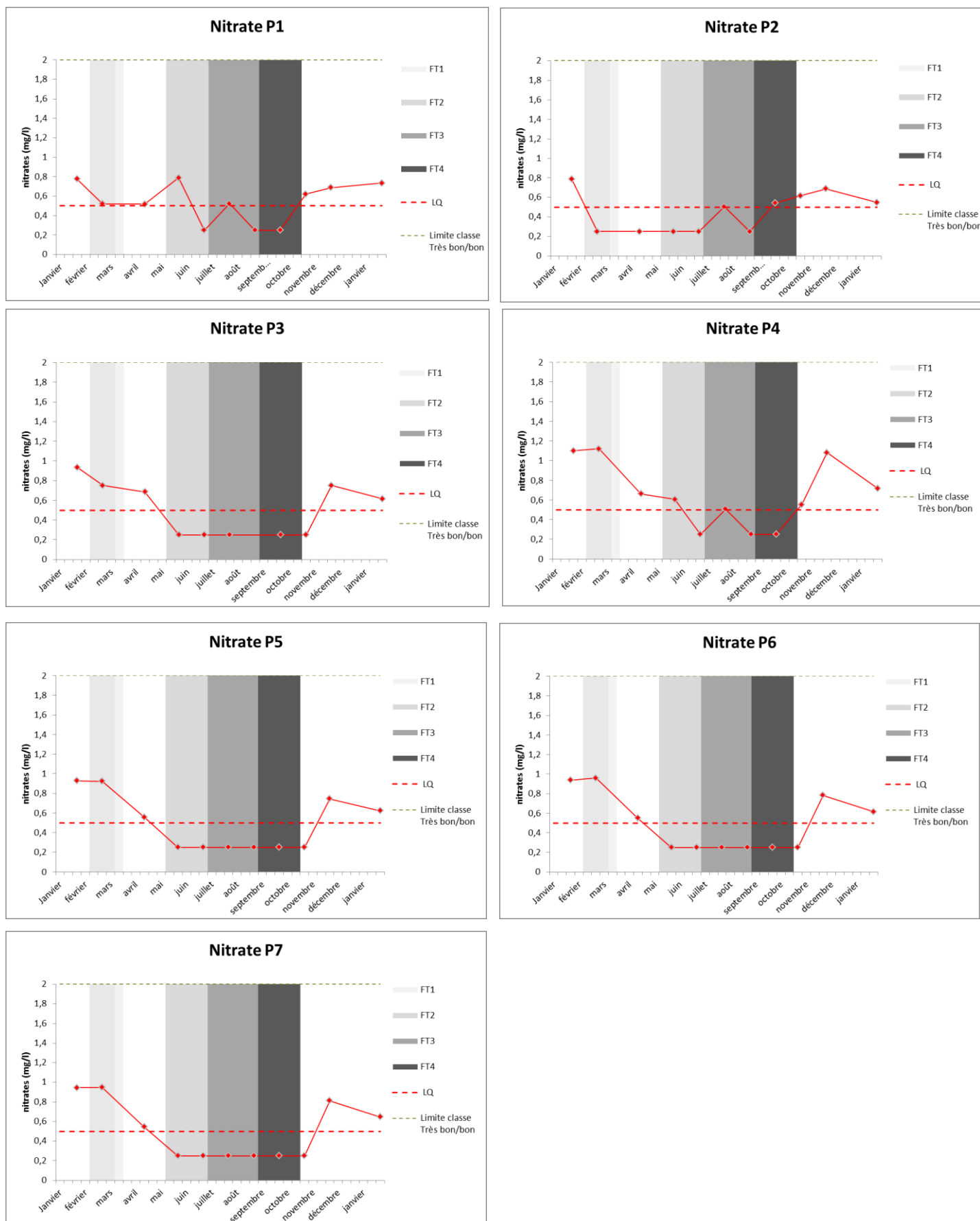


Planche 2 : Chl-a

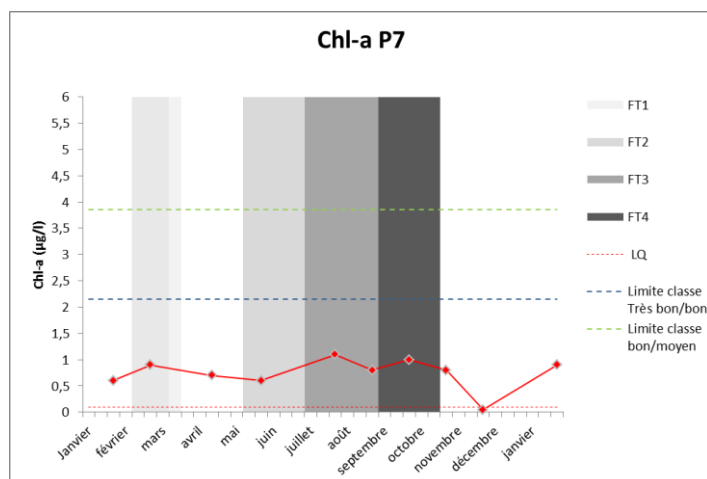
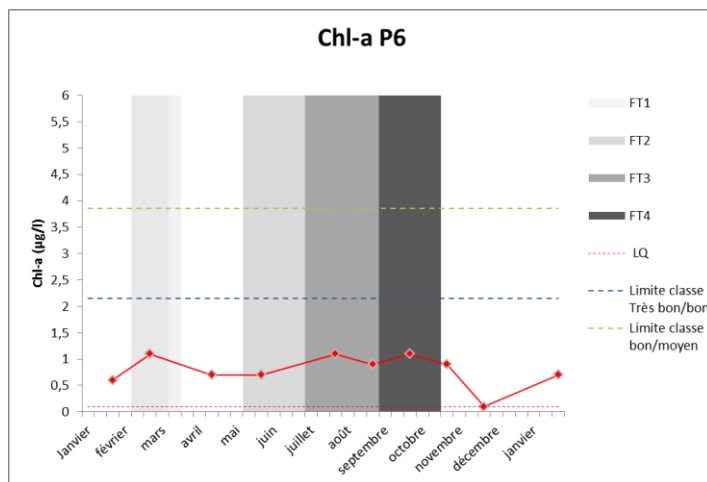
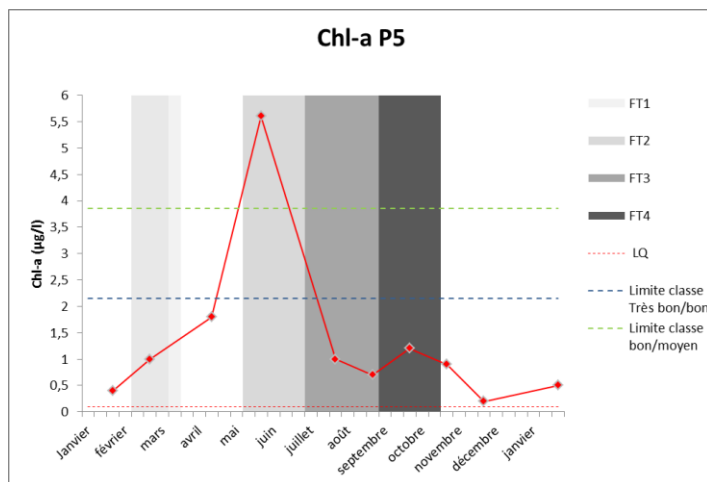
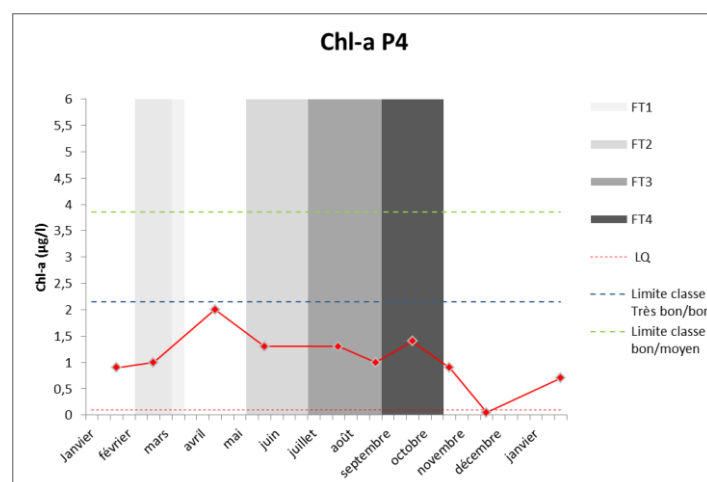
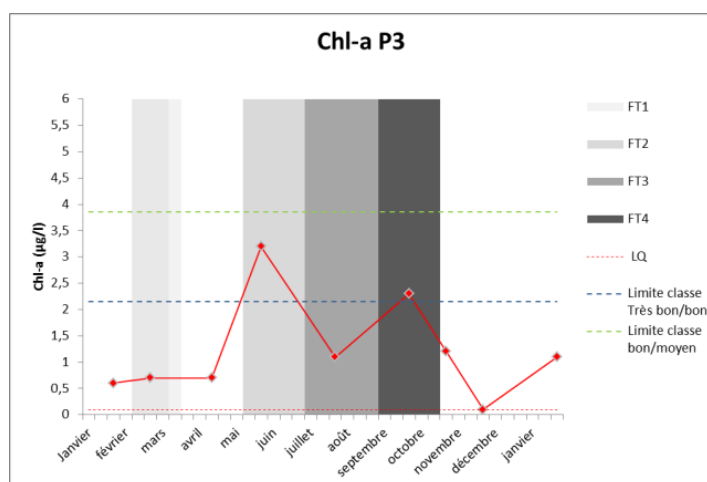
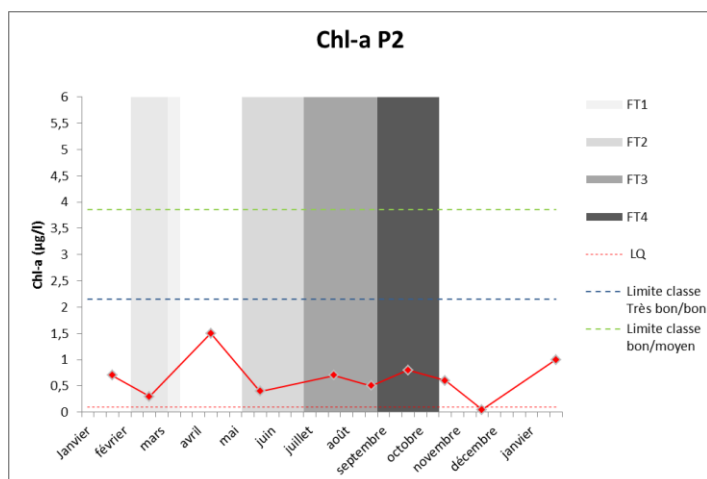
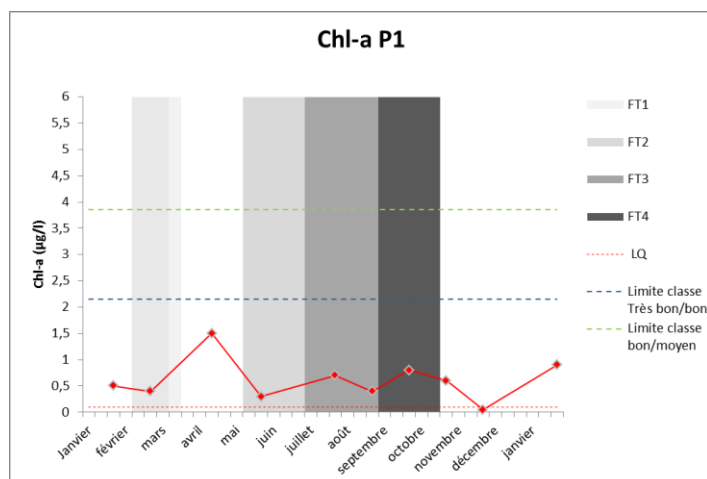


Planche 3 : Secchi

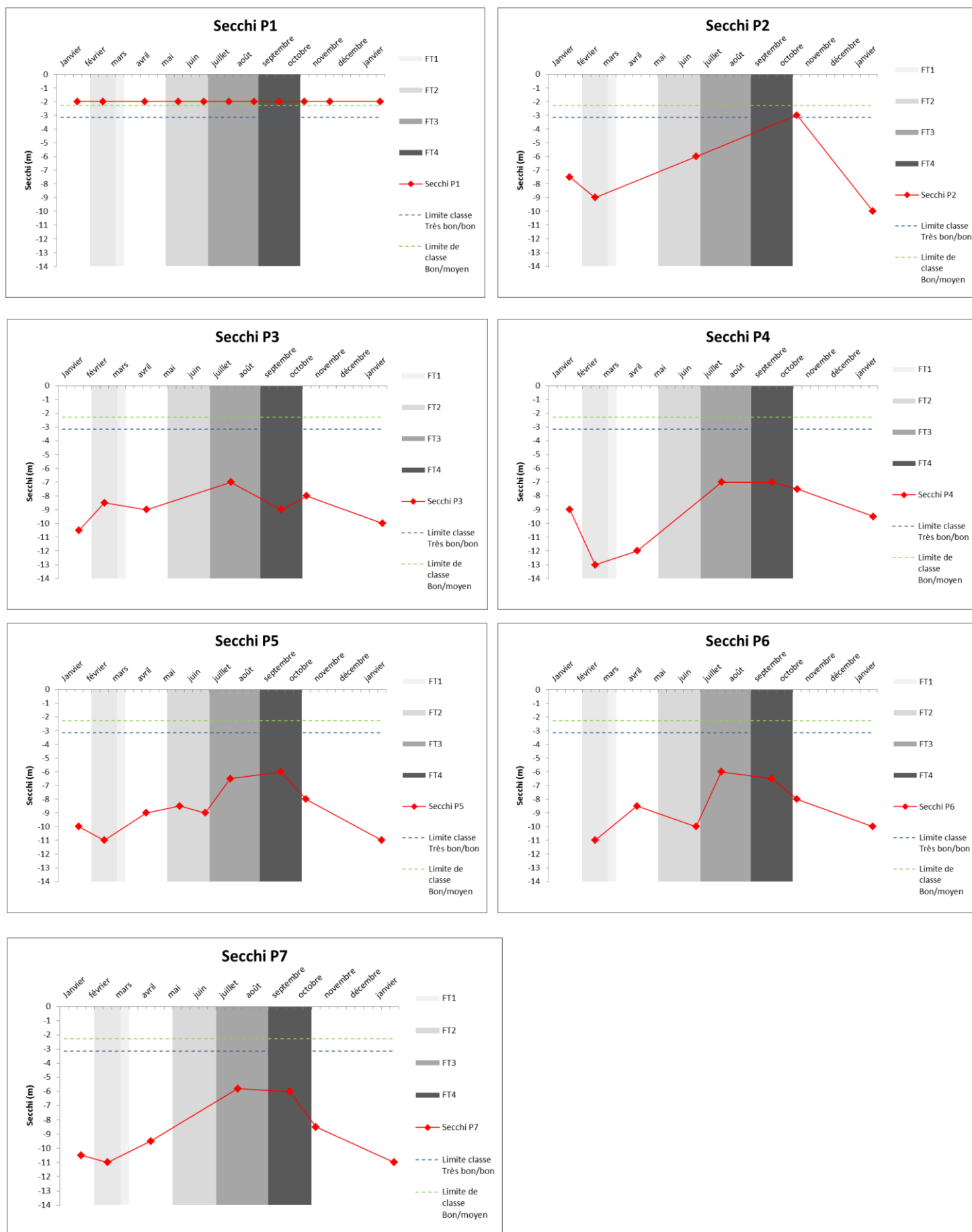
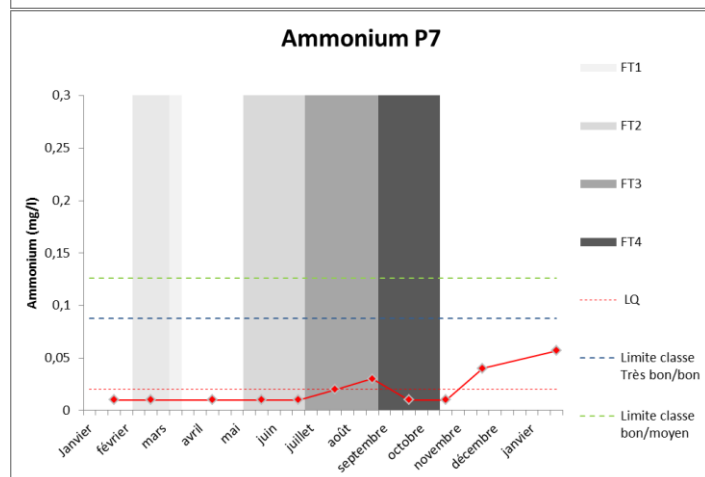
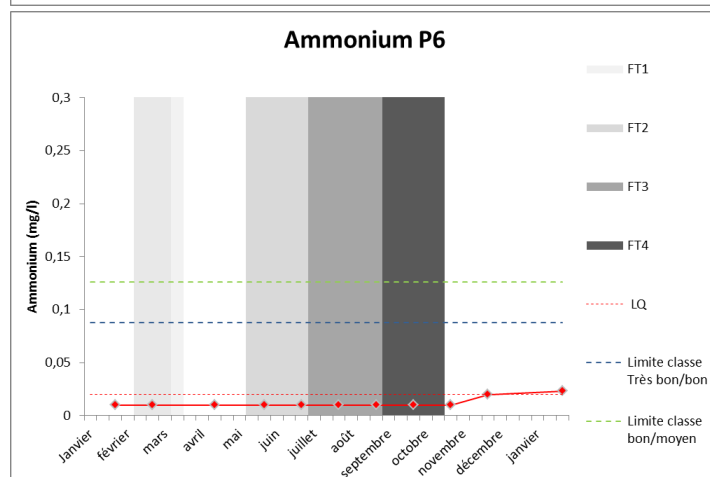
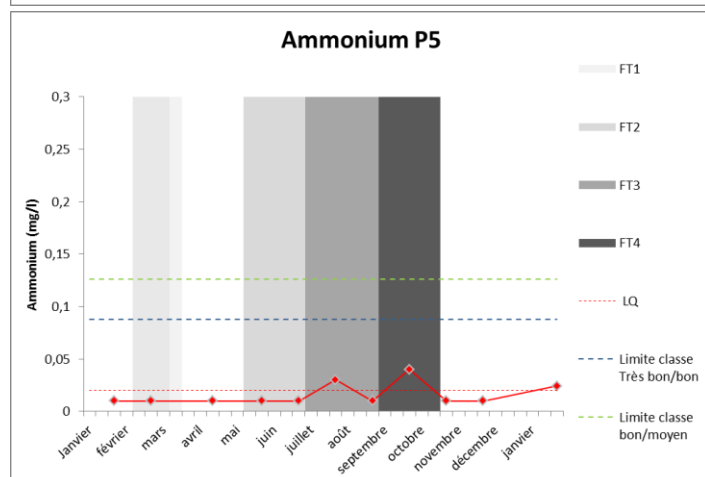
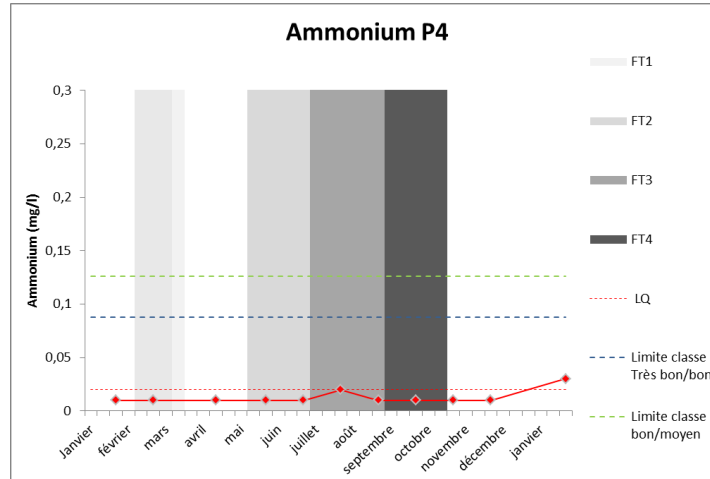
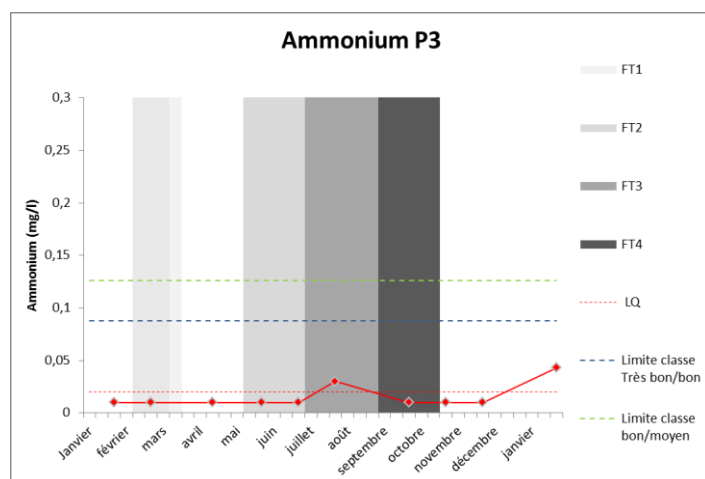
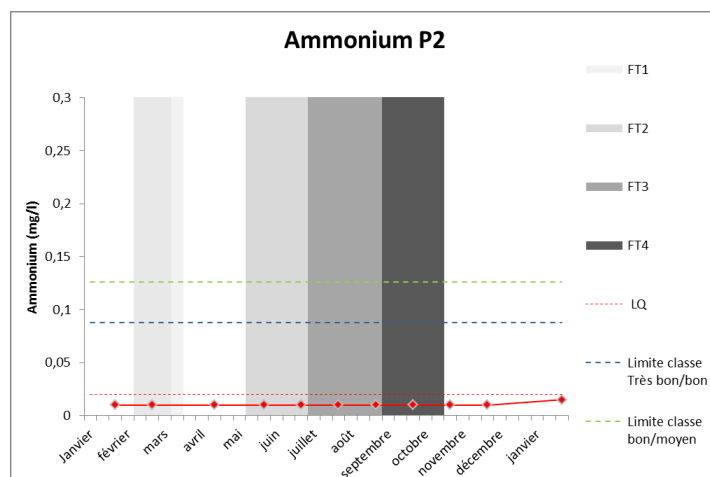
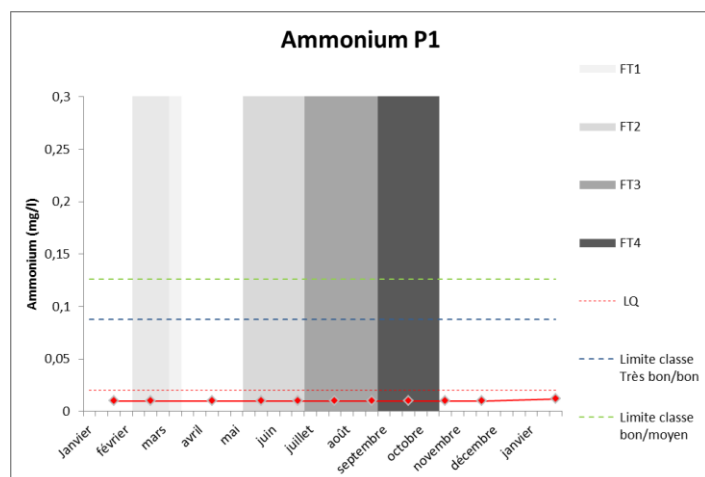


Planche 4 : Ammonium



Annexe 17 : L'eutrophisation naturelle et anthropique d'un lac