

Syndicat Mixte EDENN
32 quai de Versailles
44000 NANTES



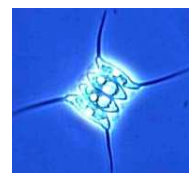
Le Lac de Vioreau :
Etude-diagnostic de l'Eutrophisation
Plan d'actions

Etat des lieux - Diagnostic

Février 2017



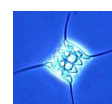
Limnologie sarl



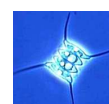
8 rue Charles Lindbergh
35150 JANZE
www.igrad.fr



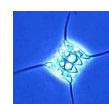
SOMMAIRE



SOMMAIRE.....	2
Avant-propos.....	11
ETAPE 1 : Caractérisation générale du territoire, synthèse des données de qualité de l'eau et Protocole d'analyses complémentaires	15
I. Caractérisation du territoire d'étude.....	16
I.1. Situation géographique et découpage administratif.....	16
I.2. Les usages de Vioreau	18
I.3. Contexte géologique	21
I.4. Topographie	24
I.5. Contexte hydrologique / hydraulique.....	25
I.5.1. Pluviométrie.....	25
I.5.2. Particularités du réseau hydrographique.....	28
I.5.3. Les rigoles des Ajots et de l'Isac.....	29
I.5.4. Incidences de la gestion hydraulique sur la définition de l'aire d'alimentation du lac de Vioreau.....	34
I.6. Gestion hydraulique du Grand Vioreau	35
I.6.1. Caractéristiques du plan d'eau.....	35
I.6.2. Les exutoires du Grand Vioreau	39
I.7. L'occupation des sols.....	41
I.8. Natura 2000.....	43
II. Synthèse et valorisation des données de la qualité de l'eau existantes.....	46
II.1. Le suivi de la qualité du Grand Vioreau : réseau départemental.....	46
II.2. Les autres réseaux de suivi : Provostière et Poitevineière.....	49
II.3. Le suivi sanitaire estival des eaux de baignade de Vioreau.....	51
II.4. Fonctionnement du lac de Vioreau : mise en perspective avec les lacs suivis par l'AELB (banque OSUR)	56
III. Le suivi complémentaire 2015-2016.....	59
III.1. Les conditions hydrologiques du suivi.....	59
III.2. Les dates de prélèvement.....	61
III.3. Les points du suivi	62



ETAPE 2: Diagnostic affiné des pressions impactant la qualité de l'eau de Vioreau	64
I. Les sources d'altérations à l'échelle du bassin versant d'alimentation.....	65
I.1. Rappel sur les types de sources de Phosphore.....	65
I.2. La source liée à l'assainissement collectif.....	67
I.2.1. Impact de la station d'épuration du bourg de la Meilleraie-de-Bretagne	67
I.2.2. Le hameau de la Croix aux Camus.....	69
I.2.3. Les lagunes naturelles de Joué-sur-Erdre.....	70
I.3. La source liée à l'assainissement non collectif.....	71
I.4. Synthèse sur les rejets liés à l'assainissement collectif et non-collectif à l'échelle du bassin versant de Vioreau.....	75
I.5. La pression liée à l'érosion	76
I.5.1. L'approche terrain développée	76
I.5.2. Résultats : carte des bordures de parcelles à risque de transfert.....	78
I.5.3. Les parcelles directement connectées au cours d'eau.....	81
I.5.4. Les facteurs aggravants	84
I.6. Cas particulier : rejet de fosse agricole.....	87
I.7. Les résultats du suivi complémentaire.....	88
I.8. Autres sources : pêcheurs, oiseaux et poissons.....	94
II. Fonctionnement hydro-biologique de Vioreau.....	99
II.1. Emergence du bloom de 2016.....	99
II.2. Paramètres aggravants pour le soutien des blooms.....	107
II.3. Secteurs d'apparition des cyanobactéries	108
II.4. Le domaine climatique.....	110
II.5. Statut trophique et nutriments.....	112
II.6. Morphologie lacustre.....	114
II.7. Le régime des vents.....	116
II.8. Caractérisation des sédiments	120
CONCLUSIONS du DIAGNOSTIC.....	125



Liste des figures :

Figure 1 : Le bassin versant de l'Erdre, affluent rive droite de la Loire s'étend sur une surface d'environ 1 000 km ²	12
Figure 2 : Objectifs et calendrier prévisionnel de la mission (lors de l'OS).....	14
Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Erdre : le cours d'eau principal s'écoule d'Est en Ouest dans sa partie a mont jusqu'à la commune de Nort-sur-Erdre (source Edenn).....	16
Figure 4 : Découpage administratif du bassin versant de Vioreau, incluant les trois principaux plans d'eau.....	17
Figure 5 : Schéma du principe d'alimentation en eau du Canal de Nantes à Brest (source CD44).....	18
Figure 6 : Principaux usages récréatifs sur le plan d'eau de Vioreau.....	19
Figure 7 : Carte géologique simplifiée du Domaine Ligéro-Séna.....	21
Figure 8 : Contexte géologique du bassin versant de Vioreau au 1/50 000ème (source Infoterre).....	22
Figure 9 : Cartographie de l'altimétrie (en m NGF) du bassin versant de Vioreau.....	24
Figure 10 : Précipitations mensuelles à Nantes sur la période 1981-2010 (source infodimat.fr).....	25
Figure 11 : Focus sur l'évolution des précipitations mois par mois, pour novembre, décembre et janvier observée à Nantes sur la période 1990-2016 (source infodimat.fr).....	26
Figure 12 : Evolution piézométrique du captage 04514X0018/01 à Nort-sur-Erdre (Source ADES).....	27
Figure 13 : Réseau hydrographique du secteur d'étude.....	28
Figure 14 : Principe d'alimentation en eau de Vioreau (CD44).....	29
Figure 15 : Zoom sur la rigole d'alimentation des Ajots.....	30
Figure 16 : Diminution sensible du bassin versant d'alimentation de Vioreau.....	31
Figure 17 : Répartition des débits au niveau de la jonction entre le ruisseau de l'Estival et la rigole de l'Isac.....	32
Figure 18 : Localisation de l'ouvrage de vannage de la rigole de l'Isac.....	33
Figure 19 : Actualisations sur le principe d'alimentation et de circulation des eaux superficielles.....	33
Figure 20 : Diminution sensible du bassin versant actuel alimentant le plan d'eau de Vioreau.....	34
Figure 21 : Vue aérienne du grand réservoir de Vioreau (source Géoportail).....	35

Figure 22 : Caractéristiques des vannages du Petit Vioreau et du Grand Vioreau.....	36
Figure 23 : Suivis journaliers de la hauteur d'eau du Grand Vioreau pour la période 2014-2016.....	38
Figure 24 : Gestion hydraulique de la partie aval de Vioreau.....	39
Figure 25 : Les zones boisées (boisements, forêts) du bassin versant de Vioreau.....	41
Figure 26 : Les haies bocagères géolocalisées sur le bassin versant de Vioreau.....	42
Figure 27 : Périmètre du site Natura 2000 N°FR5200628 "Forêt, Etang de Vioreau, Etang de la Provostière".....	43
Figure 28 : Localisation de la flore remarquable identifiée sur le secteur de Vioreau (source EDENN).....	44
Figure 29 : Cartographie des habitats recensés sur le secteur de Vioreau (source EDENN)...	45
Figure 30 : Localisation des stations de suivis de la qualité du Grand Vioreau.....	46
Figure 31 : Evolution de la concentration en phosphore total (6 analyses/an) dans le Grand Vioreau et pluviométrie mensuelle cumulée (station météo de Nort-sur-Erdre).....	47
Figure 32 : Evolution comparée des concentrations en phosphore total, en orthophosphates et en matières en suspension dans le grand Vioreau.....	47
Figure 33 : Evolution comparée du phosphore total, des MES et de la chlorophylle a.....	48
Figure 34 : Evolution comparée des concentrations en phosphore total, en orthophosphates et en matières en suspension dans l'étang de Provostière.....	49
Figure 35 : Evolution comparée des concentrations en phosphore total, en ortho-phosphates et en matières en suspension dans l'étang de Poitevineière.....	50
Figure 36 : Effectifs de cyanobactéries dans les eaux du lac de Vioreau (2004-2015).....	52
Figure 37 : Fréquence de distribution des seuils d'alerte OMS dans le lac de Vioreau entre 2004 et 2015.....	53
Figure 38 : Relation entre durée de dépassement et densité cellulaire maximale dans les baignades de Bretagne-Mayenne et le lac de Vioreau (en bleu) entre 2004 et 2015.....	54
Figure 39 : Fréquence d'observation et contribution aux effectifs des taxons observés dans le Vioreau (2004-2015).....	55
Figure 40 : Etat trophique (azote, phosphore, carbone) des eaux des lacs suivis par l'AELB..	56
Figure 41 : Etat trophique (azote, phosphore, carbone) des sédiments des lacs suivis par l'AELB.....	57
Figure 42 : Evolution piézométrique journalière à Nort-sur-Erdre sur la période 2012-2016 (source ADES).....	60

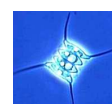


Figure 43 : Débits cumulés de l'Erdre a mont, présentés par année hydrologique (sept – août) de 2012-2017, et comparés au module interannuel (Banque hydro).....	60
Figure 44 : Conditions pluviométriques lors des périodes d'échantillonnage.....	61
Figure 45: Localisation des points du suivi complémentaire sur le bassin versant de Vioreau	62
Figure 46 : Les différentes sources de Phosphore à l'échelle d'un bassin versant.....	65
Figure 47 : Localisation des stations d'épuration du bassin versant de Vioreau.....	67
Figure 48 : Variations des débits journaliers rejetés en fonction de différentes périodes de l'année, pour la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne.....	69
Figure 49 : Les habitats denses aux abords immédiats du Vioreau envoient leurs eaux usées vers les lagunes (hors BV) de Joué-sur-Erdre.....	70
Figure 50 : Localisation et hiérarchisation des ANC par rapport au réseau hydrographique..	71
Figure 51 : Equivalence entre le degré de risque de transfert de Phosphore au cours d'eau (ou fossé circulant) et le pourcentage d'abattement selon notre méthodologie.....	72
Figure 52 : La majorité des ANC est localisée sur le versant Nord du Grand Vioreau.....	73
Figure 53 : Cartographie de la densité bocagère sur la partie agricole du BV d'alimentation de Vioreau	78
Figure 54 : Cartographie du risque d'érosion des bordures de parcelles sur le bassin versant de Vioreau	79
Figure 55 : L'un des principaux cours d'eau du BV à caractère rural, le ruisseau du Pas Chevreuil.....	82
Figure 56 : Le ruisseau le Pas Chevreuil est protégé des parcelles cultivées par une bande enherbée continue le long de ses deux rives.....	83
Figure 57 : Cartographie des facteurs aggravants du risque d'érosion sur le bassin versant de Vioreau	85
Figure 58 : Localisation du rejet avéré de la fosse agricole entre la base nautique et la plage	87
Figure 59 : zoom sur les 5 stations retenues.....	88
Figure 60 : Relargage de PO4 par les 6 farines d'appâtage testées en 2016.....	94
Figure 61 : Contenu en COT, NTK et P total des 6 farines d'appâtage testées en 2016 comparé aux sédiments lacustres de la base AELB.....	95
Figure 62 : Distribution des formes de phosphore par catégories et par mois.....	98
Figure 63 : Distribution des points de mesure pour les campagnes de terrain en 2015 et 2016	99

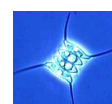


Figure 64 : Répartition spatiale des densités maximales de cyanobactéries (cell/ml) le 08/06/2016.....	100
Figure 65: Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest.....	100
Figure 67 : Répartition spatiale des densités de cyanobactéries présentes à la surface des vases (cell/ml).....	101
Figure 66: Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud.....	101
Figure 68 : Répartition spatiale des densités maximales de cyanobactéries (cell/ml) le 03/07/2015.....	102
Figure 69 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest.....	102
Figure 70 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud.....	103
Figure 71 : Répartition spatiale des densités de cyanobactéries présentes à la surface des vases (cell/ml).....	104
Figure 72 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest.....	104
Figure 73 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud.....	104
Figure 74 : Répartition spatiale des densités de cyanobactéries présentes à la surface des vases (cell/ml).....	105
Figure 75 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest.....	105
Figure 76 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud.....	106
Figure 77 : Schéma synthétique illustrant l'évolution de la biomasse planctonique dans les compartiments d'un lac.....	107
Figure 78 : Les zones de recrutement des cyanobactéries sont repérées par recoupement (lumière et déficit d'oxygène sur le fond). En 2015-16 seul le flanc Est a été observé comme zone d'émergence, le secteur Est peut cependant jouer ponctuellement ce rôle d'incubateur	109
Figure 79 : Distribution des principaux genres de cyanobactéries en fonction de la température moyenne (a), du rayonnement global (b) et de la pluviométrie cumulée (c). Les valeurs correspondant au lac de Vioreau sont représentées par des cadres translucides...	110
Figure 80 : Evolution des températures moyennes et de l'ensoleillement cumulé pour les mois les plus chauds (90 ^{ème} centile) depuis 1968 à Nort sur Erdre	111
Figure 81: Etat trophique de l'étang de Vioreau comparé aux densités cellulaires max. (cell/ml), à la durée moyenne des blooms (% de la saison sanitaire) et à leur récurrence interannuelle (% d'années où la densité max. dépasse 100 000 cell/ml).....	112
Figure 82 : Evolution des quotas de N et P selon l'axe Est-Ouest.....	113
Figure 83 : Evolution des quotas de N et P selon l'axe de circulation principal	113

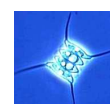


Figure 84 : Densités cyanobactériennes (cell./ml) maximales en fonction de la profondeur maximale (mètres) des plans d'eau (source : Limnosarl - LERES/EHESP)..... 114

Figure 85 : Densités cyanobactériennes (cell./ml) maximales en fonction du rapport de taille entre le lac et son bassin versant (source : Limnosarl - LERES/EHESP)..... 114

Figure 86 : Positionnement du Vioreau vis-à-vis des cyanobactéries et des toxines pour son bassin versant actuel (en haut) ou pour son bassin complet (en bas)..... 115

Figure 87 : Orientation de la plage et vents dominants enregistrés à la station de Nort-sur-Erdre..... 116

Figure 88 : Evolution saisonnière du régime dominant des vents à Nort-sur-Erdre 117

Figure 89 : Evolution des vents dominants à Nort-sur-Erdre sur la période 1980-2016..... 117

Figure 90 : Evolution de la température des eaux au fond du lac, au pied du barrage..... 119

Figure 91 : Station de prélèvement des sédiments du lac de Vioreau 120

Figure 92 : Teneur en phosphore (total) dans les sédiments de Vioreau..... 121

Figure 93 : Valeur d'EPCo des sédiments de Vioreau 122

Figure 94 : Désorption du sédiment de Vioreau, après 2 Heures dans une solution dépourvue de phosphore 122

Figure 95 : Relargage sous conditions anoxiques des sédiments de Vioreau (96H)..... 123

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Chiffres-clés du barrage de Vioreau..... 36

Tableau 2 : Correspondance des niveaux d'alertes de l'Organisation Mondiale de la Santé et du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France 51

Tableau 3 : Moyenne annuelle de la concentration en ortho-phosphates du rejet de la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne d'après les résultats des autocontrôles hebdomadaires..... 68

Tableau 4 : Moyenne annuelle des débits rejetés par la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne d'après l'examen des suivis journaliers..... 68

Tableau 5 : Flux de Phosphore lié à l'ANC obtenu d'après notre méthodologie de classification 74

Tableau 6 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°1..... 89

Tableau 7 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°2..... 89

Tableau 8 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°3..... 90

Tableau 9 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°4..... 91

Tableau 10 : Analyses des eaux superficielles : 4 campagnes au niveau du Barrage 91

Tableau 11 : Analyses des eaux superficielles : 4 campagnes au niveau de la plage 92

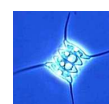


Tableau 12 : Classement des zones de baignade selon la directive 2006/7/CE..... 93

Liste des photos :

Photo 1 : En 2014, la base nautique de Vioreau a été modernisée par la construction d'un nouveau bâtiment..... 20

Photo 2 : Affleurement de schistes violacés au niveau du creusement de la rigole des Ajots, entre Provostière et Vioreau..... 22

Photo 3 : Vue de la jonction entre le ruisseau de l'Estival et la rigole (ancien vannage) de l'Isac..... 32

Photo 4 : Vue du parement aval du barrage de Vioreau (2016)..... 37

Photo 5 : Vue du déversoir de crue du barrage de Vioreau (niveau de remplissage maximal) 37

Photo 6 : Vue de la carrière recevant les eaux d'évacuation du Grand Vioreau 39

Photo 7 : Déversoir d'écoulement des eaux de la retenue vers le ruisseau le Baillou..... 40

Photo 8 : Une vanne permet la régulation du passage des eaux vers la rigole alimentaire du canal de Nantes à Brest..... 40

Photo 9 : Dans certaines configurations, le rôle de protection des bandes enherbées peut être court-circuité par l'absence de barrière physique entre la parcelle et le fossé (photo hors étude)..... 76

Photo 10 : Repérage des parcelles à risque d'érosion et de transfert potentiel de sols sur le bassin versant d'alimentation de Vioreau..... 77

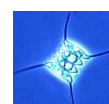
Photo 11 : Haie bocagère en cours d'arasement sur le bassin versant de Vioreau (2016)..... 79

Photo 12 : Les cours d'eau d'ordre 1 non référencés sur l'IGN ne présentent pas de caractère obligatoire pour les bandes enherbées (ici le ruisseau de la Jahotière d'ordre 1 au NW de Vioreau)..... 81

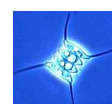
Photo 13 : Certaines entrées de champ positionnées en bas de parcelle aggravent le risque d'érosion en jouant le rôle de collecteur du ruissellement..... 84

Photo 14 : Ruissellement sur blé d'hiver formant une eau marron enrichie en particules de sols se déversant dans un fossé circulant (photo prise hors BV lors de l'hiver pluvieux de 2013/2014)..... 86

Photo 15 : Fossé circulant véhiculant des eaux marron chargées en particules de sols provenant d'une parcelle située en amont (photo prise hors BV lors de l'hiver pluvieux de 2013/2014)..... 86



Avant-propos



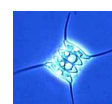
Le bassin versant de l'Erdre, affluent rive droite de la Loire, représente une vaste surface d'environ 1 000 km² (Figure 1) et comprend une multitude d'acteurs liés à l'eau. Le syndicat mixte Edenn est la structure référente du SAGE Estuaire de la Loire pour le bassin versant de l'Erdre.



Figure 1 : Le bassin versant de l'Erdre, affluent rive droite de la Loire s'étend sur une surface d'environ 1 000 km².

L'Edenn mène des actions qui relèvent de trois thématiques : la biodiversité, l'eau, les usages. Elle a pour mission de coordonner les usages de l'Erdre, notamment autour de la navigation et de la sécurité. Ses actions concernent ensuite l'amélioration de la qualité de l'eau avec pour problématique principale la réduction des rejets de produits phytosanitaires et du phosphore de l'Erdre, considéré comme en "mauvais état écologique".

Le réservoir principal de Vioreau, plus grand plan d'eau navigable de Loire-Atlantique, voit ses eaux particulièrement dégradées en raison du risque bactériologique et de celui lié aux développements intempestifs (blooms) des cyanobactéries dans la colonne d'eau. Ce dernier se traduit par des épisodes ponctuels et récurrents de prolifération de ces microalgues dans



Le plan d'eau, y compris au niveau de la zone de baignade. Les activités de baignade sont ainsi limitées, voire interdites lors des plus fortes concentrations en cyanobactéries, selon des préconisations d'ordre sanitaire (ARS). Le profil de baignade réglementaire a été réalisé en 2014 par Minyvel. Il proposait des actions de reconquête, et préconisait de développer une approche plus étendue pour caractériser les causes des blooms récurrents sur ce plan d'eau.

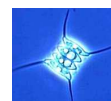
En 2015, l'Edenn engage donc une étude ciblée sur l'eutrophisation du lac artificiel de Vioreau, afin d'affiner son fonctionnement hydro-biologique. Ce diagnostic cherchera à identifier les causes de la présence de cyanobactéries en forte concentration, intégrant le poids des flux hydriques et sédimentaires, en répondant aux points suivants :

- expliciter la variabilité interannuelle et spatiale du développement algal
- caractériser et évaluer l'impact des flux polluants (paramètre phosphore : élément nutritif contrôlant le niveau trophique de la masse d'eau)
- identifier les éléments et les indicateurs d'alerte du déclenchement d'un bloom
- évaluer l'impact et la capacité des sédiments à relarguer le phosphore
- définir le rôle des courants et de la stratification des eaux dans la répartition et l'apparition des cyanobactéries

L'approche terrain développée sur l'identification des sources de nutriments (phosphore) et leurs transferts au lac s'articule à plusieurs échelles spatiales, passant du bassin versant d'alimentation aux versants immédiats du lac, puis se recentre sur la masse d'eau et ses sédiments.

Rappelons ici le contexte fortement artificialisé du bassin versant, hydrauliquement parlant, avec la succession, en série, de trois plans d'eau créés pour l'alimentation du canal: Poitevinrière, Provostière et Vioreau et l'alimentation en eau par les rigoles.

La dynamique de mise en place de blooms de cyanobactéries a pu être étudiée in-situ lors des saisons estivales de 2015 et 2016. Les informations apportées par ces investigations terrain, en parallèle du traitement des données historiques des suivis permettent d'identifier les paramètres clés contrôlant et/ou aggravant ces blooms estivaux.



L'ensemble des résultats du diagnostic affiné sur le lac de Vioreau aboutit à l'élaboration d'un plan d'actions hiérarchisées pour tenter de limiter le risque sanitaire lié aux cyanobactéries.

Le calendrier de l'étude sur l'étude sur l'eutrophisation du lac de Vioreau est précisé sur la figure suivante.



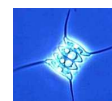
Figure 2 : Objectifs et calendrier prévisionnel de la mission (lors de l'OS)

Un comité technique (CT) et un comité de pilotage (CP) sont en charge de valider chacune des étapes de la mission.

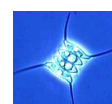
L'évolution des conditions hydrologiques de l'hiver 2015-2016 (hiver sec) a conduit à une adaptation du protocole, avec une diminution des investigations sur les cours d'eau (pas de flux hivernaux significatifs) et un renforcement du suivi dans le Lac.

Au niveau du planning, ceci s'est traduit par un prolongement de la mission jusqu'au début de janvier 2017 afin de poursuivre l'observation du bloom estival jusqu'à sa fin (automne 2016). La reprise des débits hivernaux n'a étonnamment pas été observée non plus sur ce second hiver !

Le dernier comité de Pilotage vient conclure cette mission en février 2017.



ETAPE 1 : Caractérisation générale du territoire, synthèse des données de qualité de l'eau et Protocole d'analyses complémentaires



I. Caractérisation du territoire d'étude

I.1. Situation géographique et découpage administratif

Le lac de Vioreau est localisé sur la partie amont du bassin versant de l'Erdre (Figure 3). Situé au Nord de Nantes, ce bassin versant couvre une superficie d'environ 1 000 km². Ce grand bassin versant s'intègre dans celui de la Loire. La confluence se trouve dans la ville de Nantes, où l'Erdre rejoint la Loire sur sa rive droite par l'intermédiaire de l'écluse Saint-Félix.

Dans sa partie amont, l'Erdre "naturelle" s'écoule d'Est en Ouest jusqu'à la commune de Nort-sur-Erdre. Dans sa partie aval, la rivière suit une direction Nord-Sud : ce tronçon allant de Nort-sur-Erdre à Nantes est considéré comme le dernier bief du canal de Nantes à Brest et correspond à l'Erdre "navigable".

Le lac de Vioreau : localisé sur la partie amont du bassin versant de l'Erdre

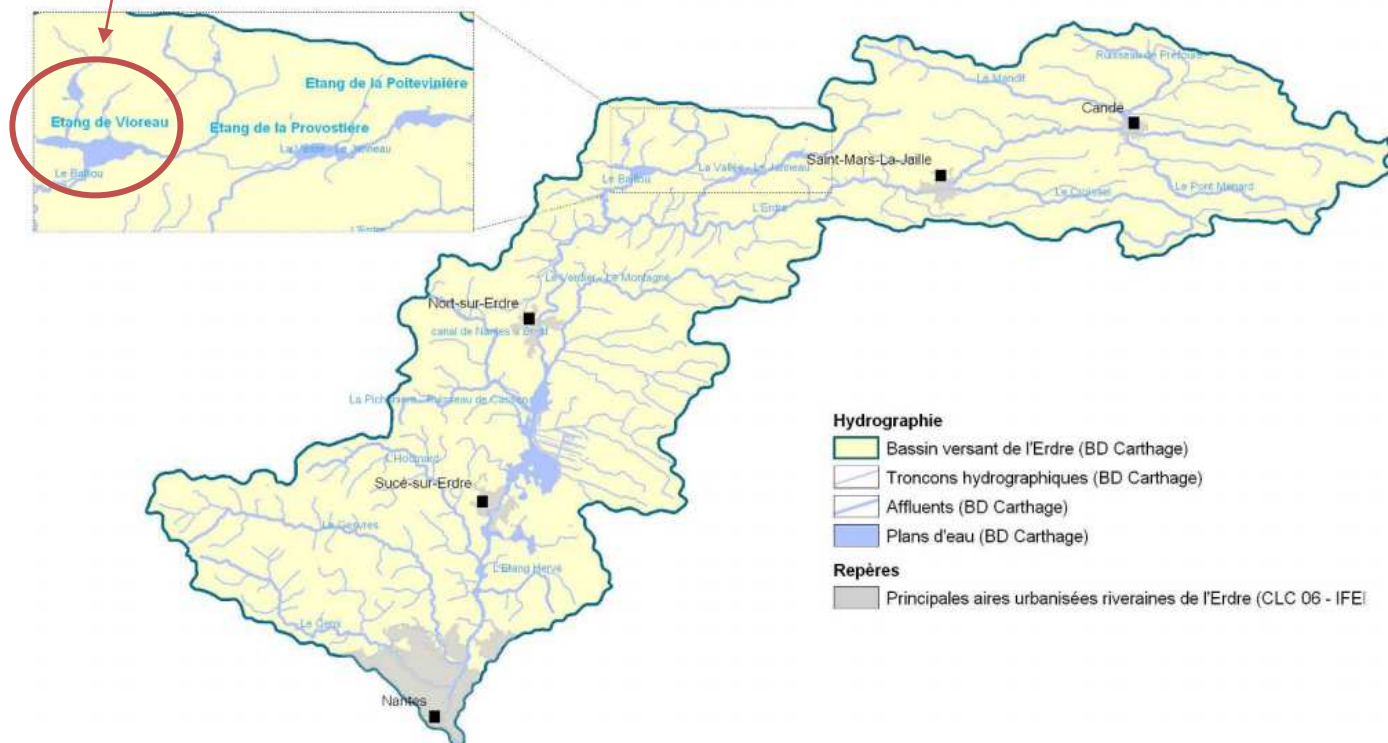


Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Erdre : le cours d'eau principal s'écoule d'Est en Ouest dans sa partie amont jusqu'à la commune de Nort-sur-Erdre (source Edenn)

Le bassin versant historique de Vioreau, comprend trois plans d'eau en série, Poitevinière, Provostière et Vioreau. Il s'étend sur les communes suivantes (Figure 4) :

- **Saint-Sulpice-des-Landes** : correspondant au bassin versant d'alimentation de Poitevinière;
- **Riaillé** : comprenant les plans d'eau de Poitevinière et Provostière;
- **la Meilleraye-de-Bretagne** : versant Nord du Grand Vioreau;
- **Joué-sur-Erdre** : incluant le Grand Réservoir de Vioreau et le Petit Vioreau;
- **Abbaretz** : le réseau hydrographique alimentant le Petit Vioreau et le ruisseau de l'Estival.

L'ensemble de ce bassin versant est inclus sur le département de Loire-Atlantique.

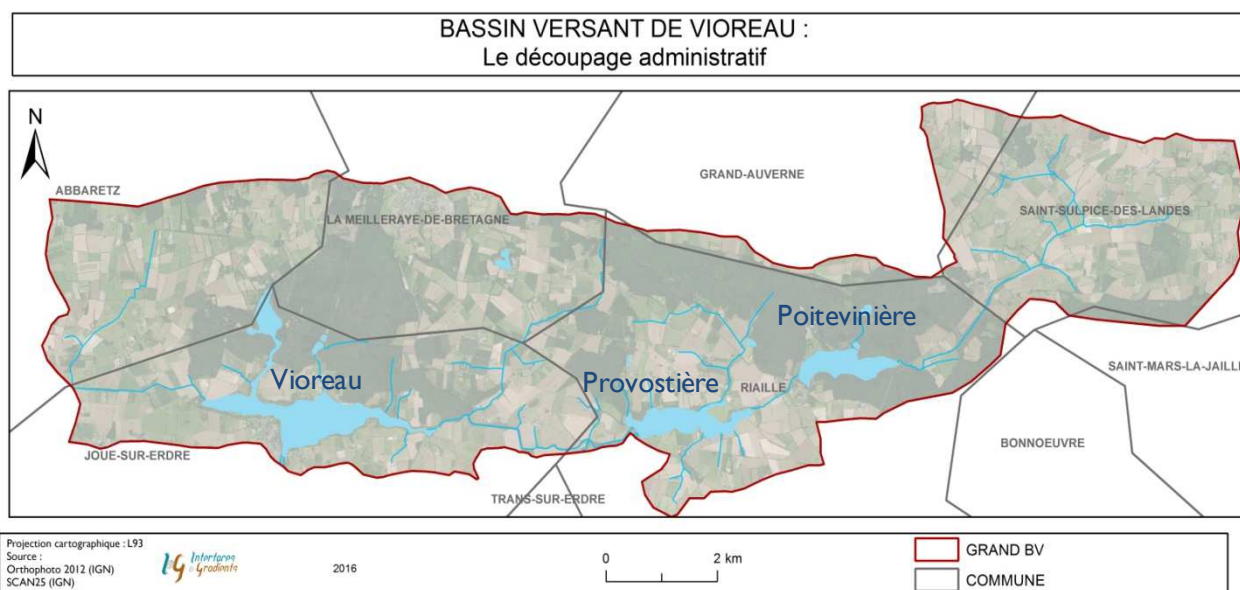
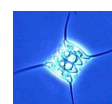


Figure 4 : Découpage administratif du bassin versant de Vioreau, incluant les trois principaux plans d'eau



I.2. Les usages de Vioreau

Exploité par le Service des Transports et de la Navigation (Conseil Départemental de Loire-Atlantique), le grand réservoir de Vioreau appartient au Domaine Public, de même que la rigole alimentaire, l'Étang de Petit Vioreau et l'Étang de Provostière.

Le grand réservoir de Vioreau est essentiellement destiné à l'**alimentation hydraulique** du Canal de Nantes à Brest, via un canal artificiel d'une vingtaine de kilomètres : la rigole d'alimentation, intégrant plusieurs ouvrages d'art et rejoignant le Canal de Nantes à Brest au niveau du bief de partage des eaux, au lieu-dit "le Pas d'Héric".

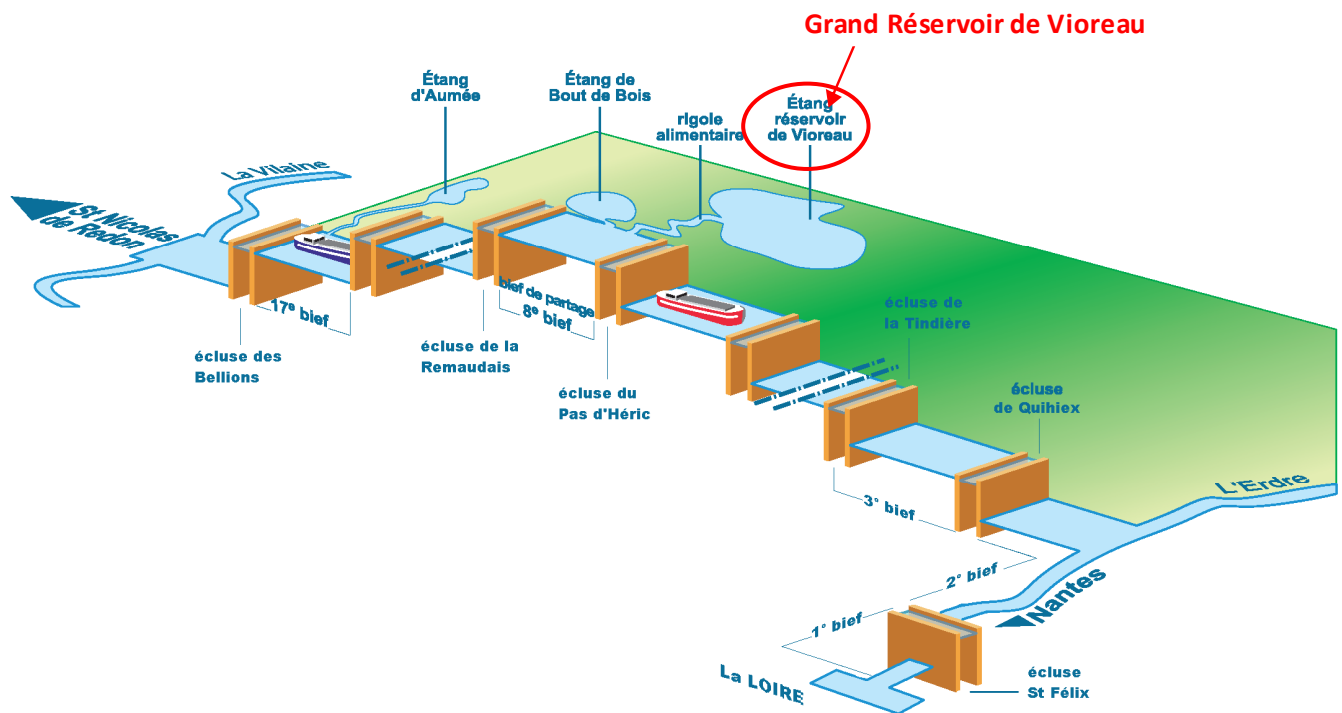


Figure 5 : Schéma du principe d'alimentation en eau du Canal de Nantes à Brest (source CD44)

Localisé en lisière de forêt, le grand Vioreau est le plus grand plan d'eau navigable de Loire-Atlantique. C'est dans ce cadre "naturel" que se développent plusieurs activités de loisirs en plein air, gérées par "Vioreau Pleine Nature". Le site est particulièrement fréquenté en période de vacances scolaires.

Le site de Vioreau offre un panel d'activités de pleine nature avec :

- une zone de baignade aménagée au nord du site et surveillée tous les jours en juillet-août, agrémentée d'une plage en bordure de la forêt,
- des sentiers balisés pour les randonnées pédestres et en VTT,
- une base nautique départementale (voile, canoë...) modernisée en 2014,
- des secteurs de pêche de nuit pour les carpestes

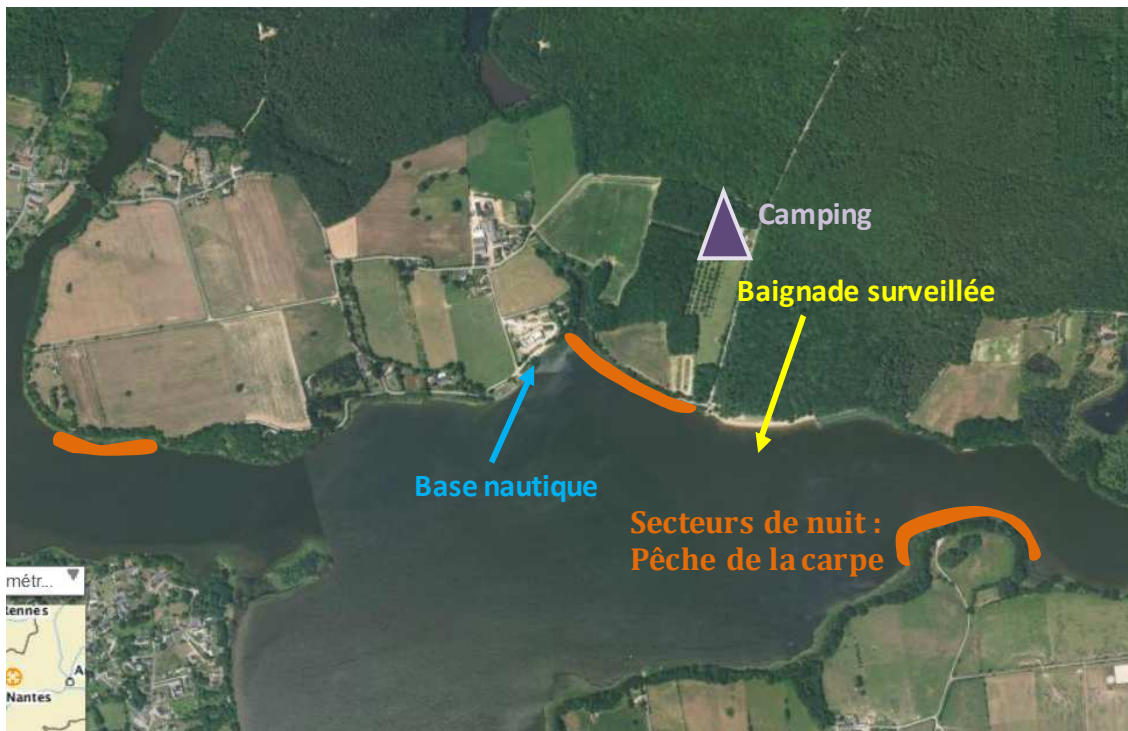


Figure 6 : Principaux usages récréatifs sur le plan d'eau de Vioreau

L'AAPPMA de Vioreau gère les populations piscicoles des deux réservoirs de Vioreau. Le grand Vioreau comporte trois secteurs de pêche de nuit pour la carpe (Figure 6) dits secteur de Bouguenais, secteur de la plage et secteur de la Hardais. La pêche en bateau est également autorisée sur ce grand plan d'eau.

L'association organise annuellement plusieurs concours de pêche, dont un enduro d'ampleur régionale sur plusieurs jours au mois de septembre. La fréquentation par les pêcheurs est

maximale en août et la grande majorité pêche à partir des berges. La queue Ouest du grand Vioreau constitue quant à elle une réserve de pêche.

Une structure récente (2014) est venue moderniser la base nautique. Equipée de salles de réunion, elle permet l'accueil d'événements d'entreprises et l'organisation de séminaires, au bord du lac. Ce nouveau bâtiment est aussi destiné à recevoir des élèves dans le cadre de projets pédagogiques liés aux activités sportives et relatives à la découverte de la nature.

En période de vacances, le site accueille des centres de loisirs proposant aux enfants des activités de plein air : course d'orientation, équitation, pêche, VTT, tir à l'arc, escalade, catamaran. Une aire de camping est située au cœur de la forêt. Vioreau Pleine Nature organise également des stages vacances pour les 8-15 ans, et propose une location de matériel (canoë, paddle, VTT, catamaran, dériveur).

Une buvette, des aires de pique-nique et une crêperie sont à disposition sur ce site très courtisé par les familles. La base nautique a enregistré une fréquentation de près de 3000 enfants en 2010.



Photo 1 : En 2014, la base nautique de Vioreau a été modernisée par la construction d'un nouveau bâtiment.

1.3. Contexte géologique

Le territoire de l'étude appartient au Domaine varisque ligéro-sénon limité au Nord par la Branche Nord du Cisaillement Sud-Armoricain (BNCSA) et limité sur son flanc Sud par la faille majeure de Nort-sur-Erdre.

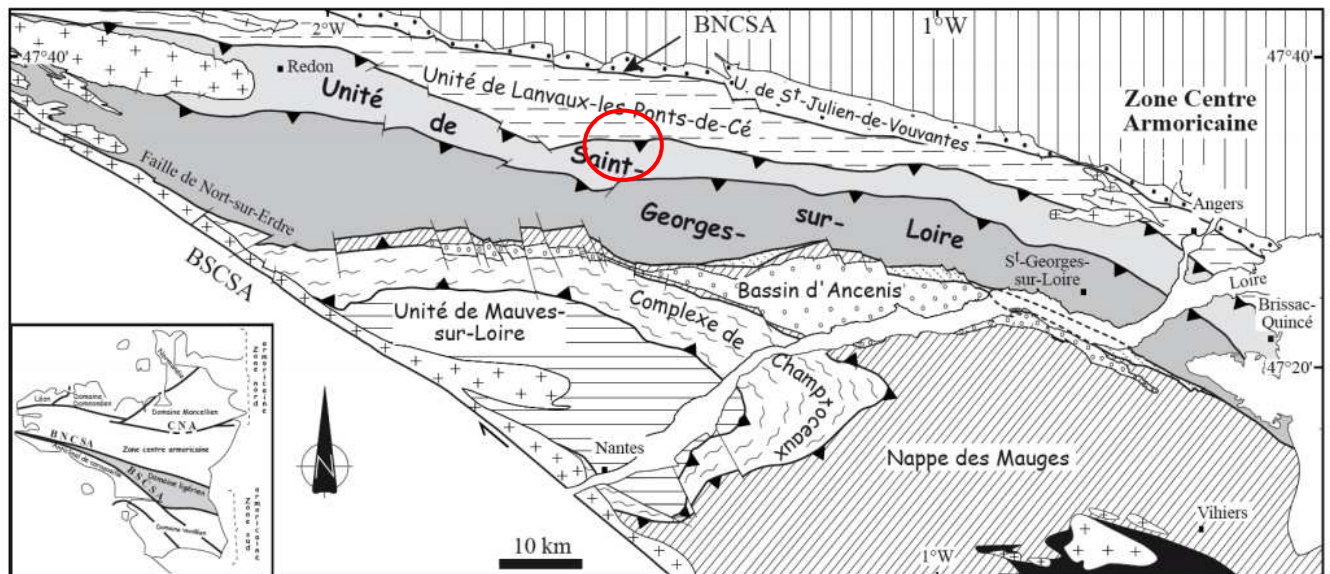


Figure 7 : Carte géologique simplifiée du Domaine Ligéro-Sénon

Cette partie du bloc sud-armoricain a été structurée par des accidents chevauchants et/ou décrochants associés à la tectonique varisque (formation d'une ancienne chaîne de montagne). L'histoire géologique est complexe, caractérisée par de longues périodes sédimentaires entrecoupées d'épisodes tectoniques, métamorphiques, plutoniques et volcaniques.

Le substratum du bassin versant de Vioreau appartenant à l'Unité dite de Saint-Georges-sur-Loire, est composée de roches détritiques schisto-gréseuses d'âge paléozoïque, au sein desquelles sont inter-stratifiées des roches volcaniques acides et basiques.

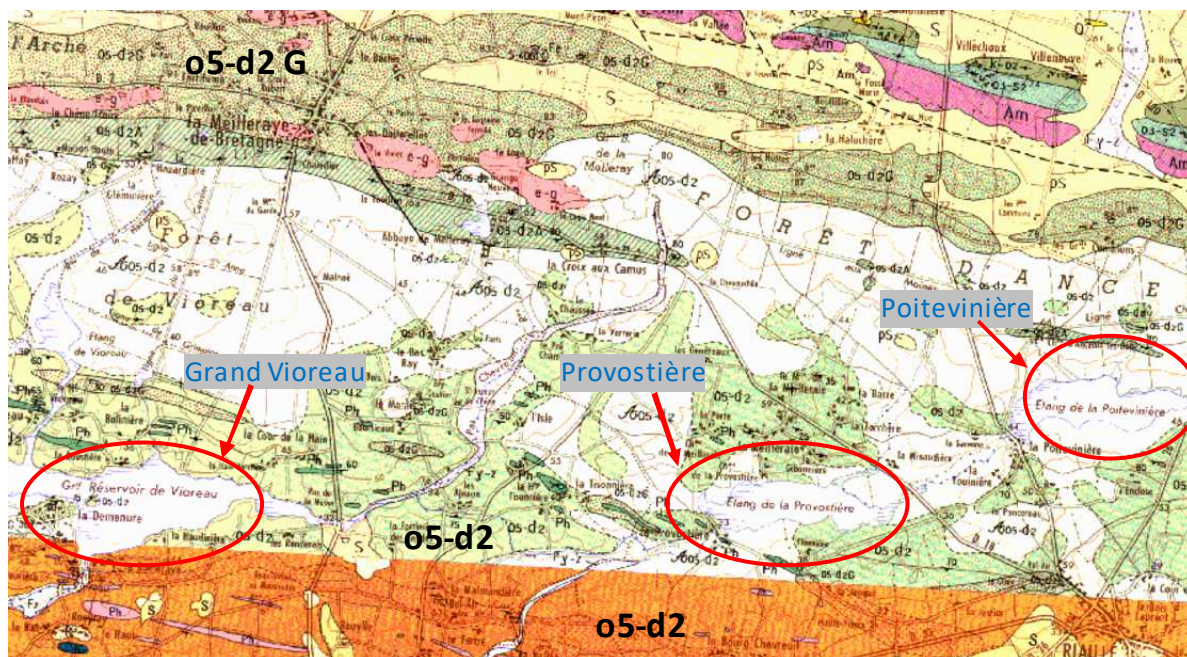


Figure 8 : Contexte géologique du bassin versant de Vioreau au 1/50 000ème (source Infoterre)

La principale formation géologique du secteur correspond à des schistes paléozoïques grisâtres à beiges (o5-d2 : en figuré vert clair et orange sur la carte), généralement fissiles et souvent luisants, riches en séricite et en chlorite. Des passées rouges ou violacées sont fréquentes sur les rives du Grand Vioreau, ainsi qu'à l'Est du plan d'eau (Photo 2) entre le Pont de la Musse et le Sud de la Tisonnière. Les boisements du secteur au nord des plans d'eau reposent quant à eux sur des faciès plus gréseux (o5-d2G).



Photo 2 : Affleurement de schistes violacés au niveau du creusement de la rigole des Ajots, entre Provostière et Vioreau

Des altérites et des dépôts superficiels viennent masquer ce substratum schisto-gréseux.

Des phanites (roches riches en quartz, argile, matière organique) apparaissent sous la forme de minces intercalations discontinues (Ph, en vert foncé : carte précédente), mais nettement alignées selon l'axe WNW-ESE.

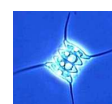
Les roches paléozoïques du socle ont subi une profonde altération sous un climat tropical chaud et humide, qui a abouti à la formation de profils latéritiques pouvant être accompagnés de cuirasses ferrugineuses et de cuirasses siliceuses.

Sur le secteur d'étude, les minerais de fer ont ainsi été l'objet d'exploitations importantes. De multiples amas de scories (mélange de roche calcinée et de fer fondu) et les aménagements d'étangs pour actionner les martinets des forges (exemple à Poitevineière) témoignent de ces anciennes activités minières.

Les formations géologiques les plus récentes du bassin versant de Vioreau correspondent aux dépôts alluviaux holocènes (Fz) qui bordent le cours de tous les ruisseaux : ce sont de fins limons d'inondation argileux gris foncé.

Du point de vue hydrogéologique, le socle représente un réservoir d'eaux souterraine, où l'eau peut circuler à la faveur de cassures et de fractures. Les débits obtenus dans les forages traversant ces formations sont en général faibles, compris entre 1 et 5 m³/h.

La nature des roches influence également la qualité des eaux souterraines qui y circulent : elles contiennent fréquemment du fer à une teneur élevée (supérieure à 1 mg/l).



I.4. Topographie

La topographie est marquée par un alignement globalement Est-Ouest, qui est lié à l'histoire géologique et la structuration hercynienne qui a marqué son empreinte sur toute la Bretagne méridionale.

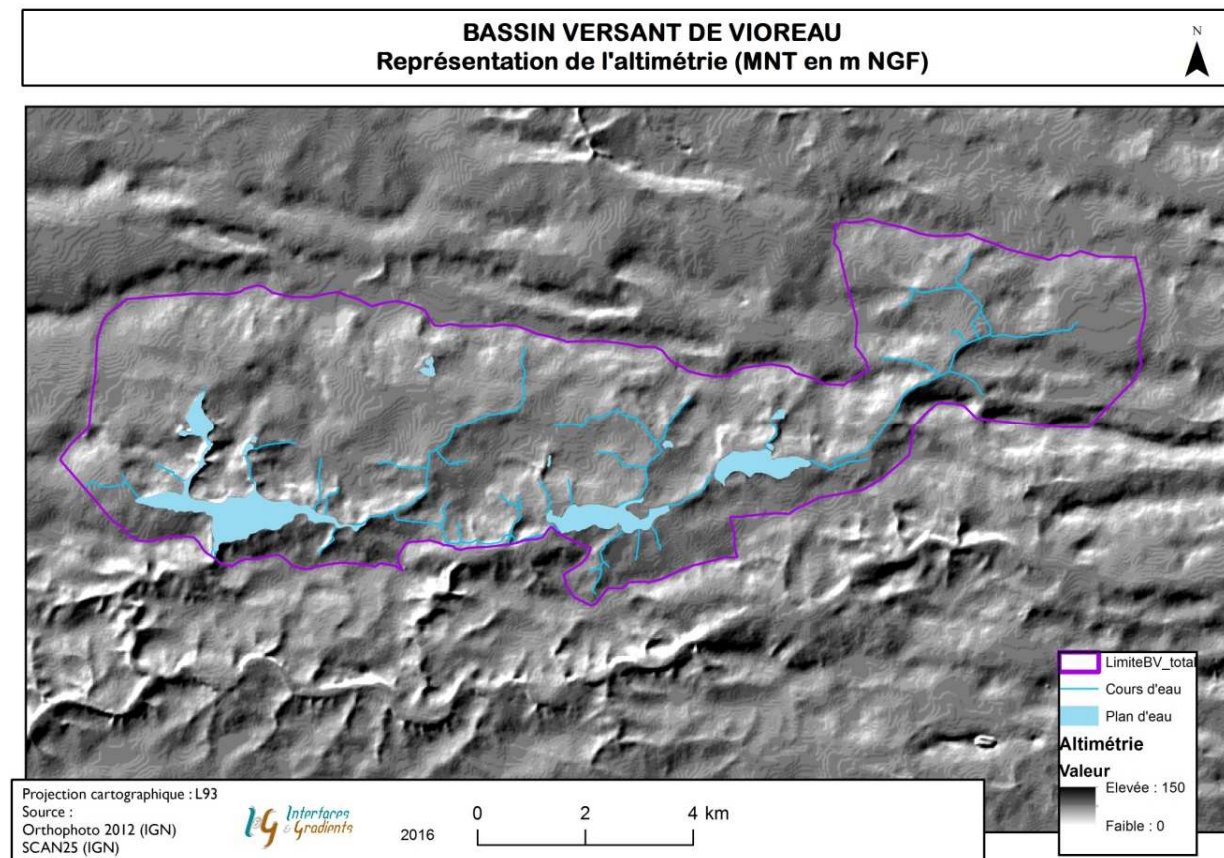


Figure 9 : Cartographie de l'altimétrie (en m NGF) du bassin versant de Vioreau

Les formations paléozoïques du secteur présentent un relief modérément accentué : de 40 à 90 m NGF. C'est sur la partie Nord du bassin versant, que le relief se rehausse avec une ligne gréseuse orientée Est-Ouest. Ces roches plus résistantes sont principalement occupées par des forêts et bosquets.

D'une façon générale, la surface d'aplanissement du bassin versant s'abaisse du Nord vers le Sud. La pente moyenne de cette surface reste modérée, de l'ordre de 1,5 %.

Localement les pentes peuvent atteindre des valeurs plus élevées, jusqu'à 3,5 % pour des parcelles agricoles situées au Nord-Ouest de Vioreau, sur ses abords immédiats.

I.5. Contexte hydrologique / hydraulique

I.5.1. Pluviométrie

Le climat du bassin versant de Vioreau est soumis aux influences océaniques. La station météorologique de référence est située à Nantes-Bouguenais, à 40 km au Sud de Vioreau. A l'échelle de l'année, les pluies sont fréquentes mais peu intenses.

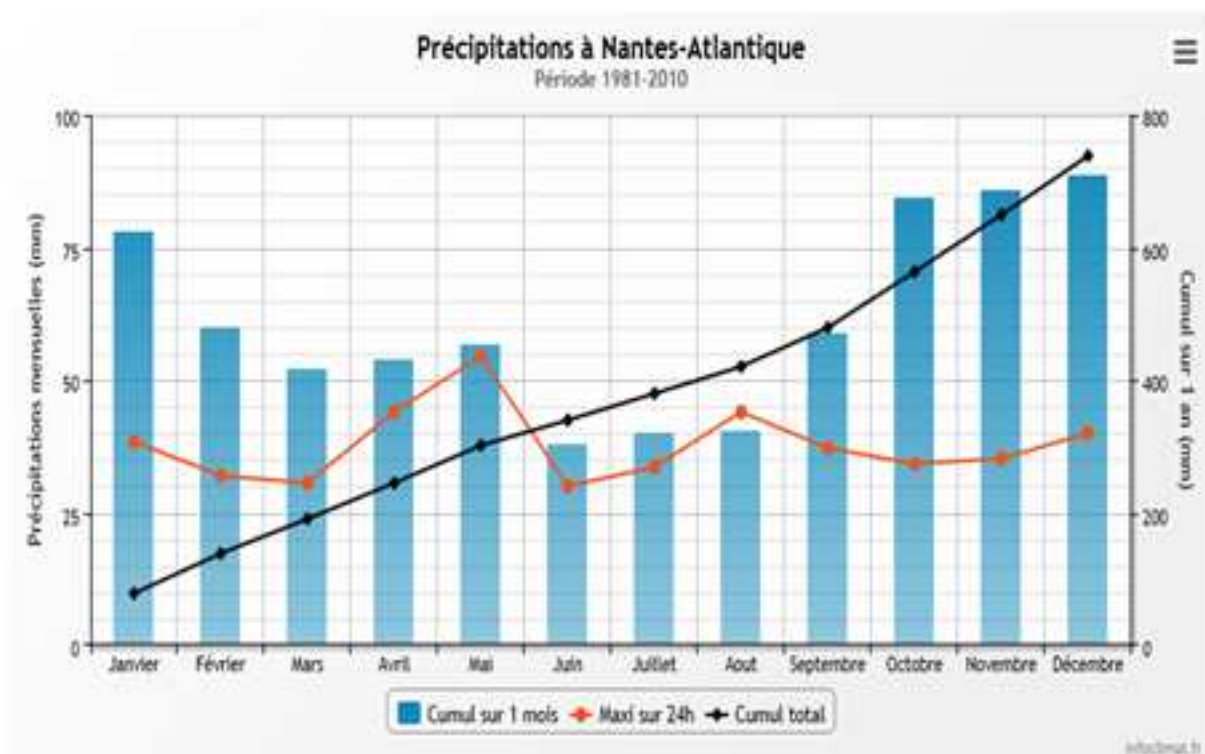
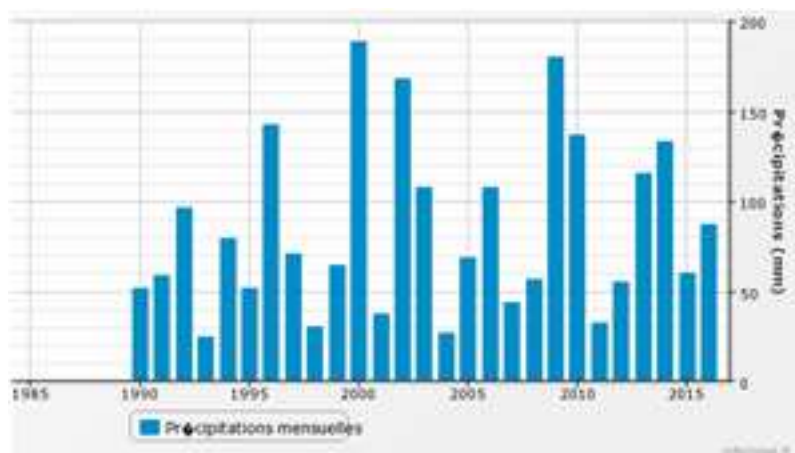


Figure 10 : Précipitations mensuelles à Nantes sur la période 1981-2010 (source infoclimat.fr)

Les précipitations sont maximales en hiver (de l'ordre de 80 mm par mois), entre les mois d'octobre et de janvier (Figure 10) : elles provoquent à la fois la reprise des débits dans les cours d'eau et la remontée du niveau piézométrique des nappes souterraines.

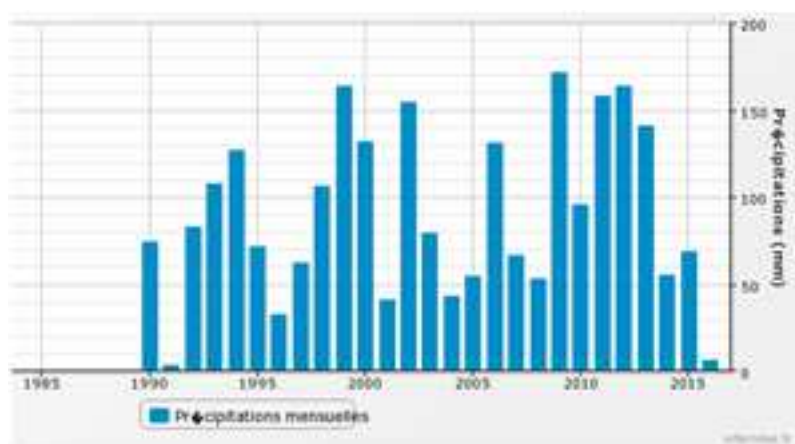
Cependant des variations interannuelles viennent perturber cette succession du cycle hydrologique, classiquement rencontrée sous le climat océanique nord-ouest. Les deux dernières années (2015 et 2016) ont notamment vu un prolongement très tardif des conditions d'étiage en fin d'année civile (Figure 11).

Pluviométrie des mois de novembre :



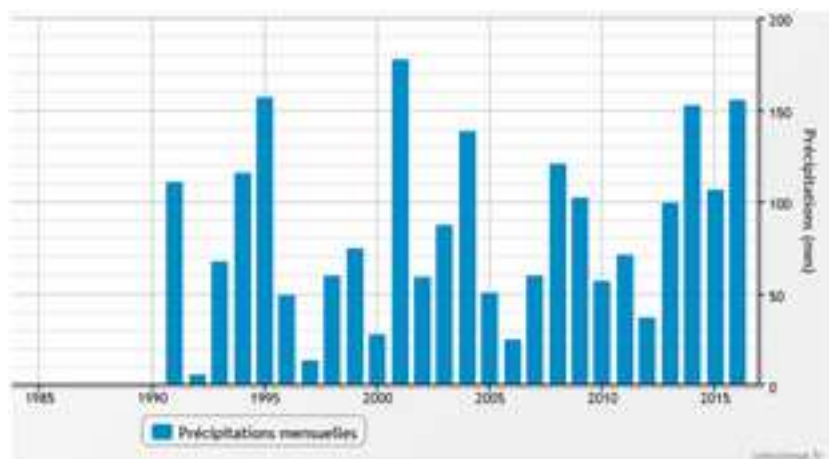
Un mois de novembre 2015 en deçà de la moyenne interannuelle (**60,5 mm** contre 84,7 mm).

Pluviométrie des mois de décembre :



Le mois de décembre 2015 prolonge cette période de basses eaux, avec une reprise seulement à partir du 21 décembre. Le cumul sur ce mois de décembre 2015 n'est alors que de **70 mm** contre 91,0 mm en moyenne interannuelle.

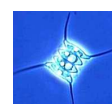
Pluviométrie des mois de janvier :



Le mois de décembre 2016, exceptionnellement sec avec moins de **10 mm** de pluie cumulée, vient aggraver le déficit pluviométrique enregistré depuis septembre 2016.

Pour l'année hydrologique 2015-2016, la reprise des débits dans les cours d'eau ne reprend qu'à la fin du mois de décembre et est réellement engagée en janvier 2016, avec de fortes pluies et un cumul qui est proche du double du cumul interannuel pour ce mois de janvier (**155 mm**).

Figure 11 : Focus sur l'évolution des précipitations mois par mois, pour novembre, décembre et janvier observée à Nantes sur la période 1990-2016 (source infloclimat.fr)



Le déficit pluviométrique rencontré en fin d'année 2015 et 2016 se traduit par un niveau piézométrique bas par rapport à la normale saisonnière du mois de décembre (piézomètre de Nort-sur-Erdre, Figure 12).

Les nappes n'ont pas débuté leur recharge en ce début de période hivernale (2015 et 2016) : les réservoirs d'eau souterraine ne participent de ce fait (quasiment) plus à l'alimentation des eaux de surface (rivières, plans d'eau), qui sont à leurs niveaux les plus bas, voire en assec.

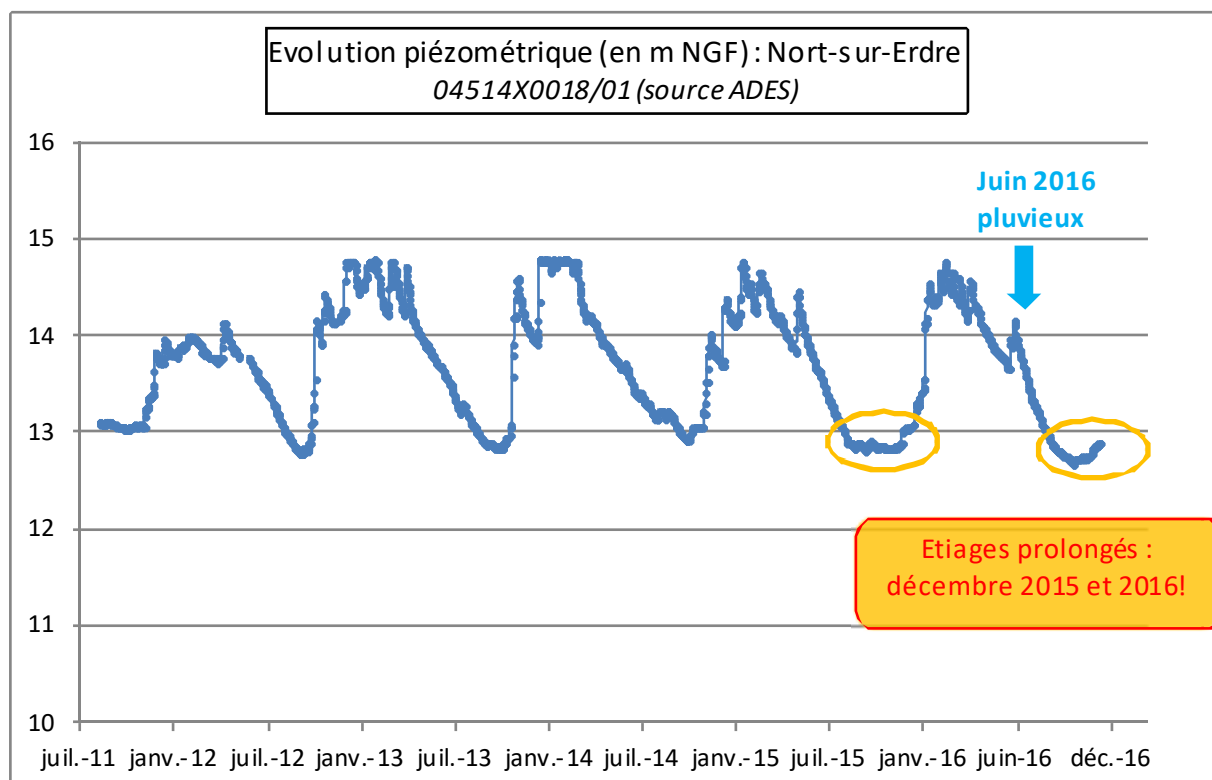


Figure 12 : Evolution piézométrique du captage 04514X0018/01 à Nort-sur-Erdre (Source ADES)

Des variations interannuelles de la pluviométrie peuvent aussi se traduire par des périodes pluvieuses supérieures à la normale, comme au printemps ou au début de l'été; ce qui a pour effet de recharger la nappe ponctuellement (ex : juin 2016, Figure 12).

1.5.2. Particularités du réseau hydrographique

Le Lac de Vioreau de par sa fonction première appartient à un réseau hydrographique (quasi hydraulique) artificialisé, fortement influencé par les besoins en eau du canal.

Il a ainsi été connecté à des zones d'alimentation en eau au-delà de son propre bassin versant topographique. Deux rigoles ont été réalisées (les 2 flèches vertes ci-dessous) lors de la création du canal, pour connecter les eaux des bassins Est et Ouest vers Vioreau. A l'est, c'est la rigole des Ajots qui peut envoyer les eaux de la Provostière vers Vioreau (contrôlé par un système de vannage), et à l'ouest la rigole de l'Isac peut également conduire les eaux d'un plus petit bassin agricole (système de vanne obsolète).

L'objectif premier de ces aménagements était bien de créer une réserve en eau suffisante à la fin de l'hiver (plus de 7 Mm³) pour pouvoir ensuite alimenter le canal. L'alimentation de Vioreau se faisait donc artificiellement par les jeux de vannages et également par les deux petits bassins versants du Pas Chevreuil (depuis la Meilleraye) et du bassin amont du Petit Vioreau (2 flèche bleues).

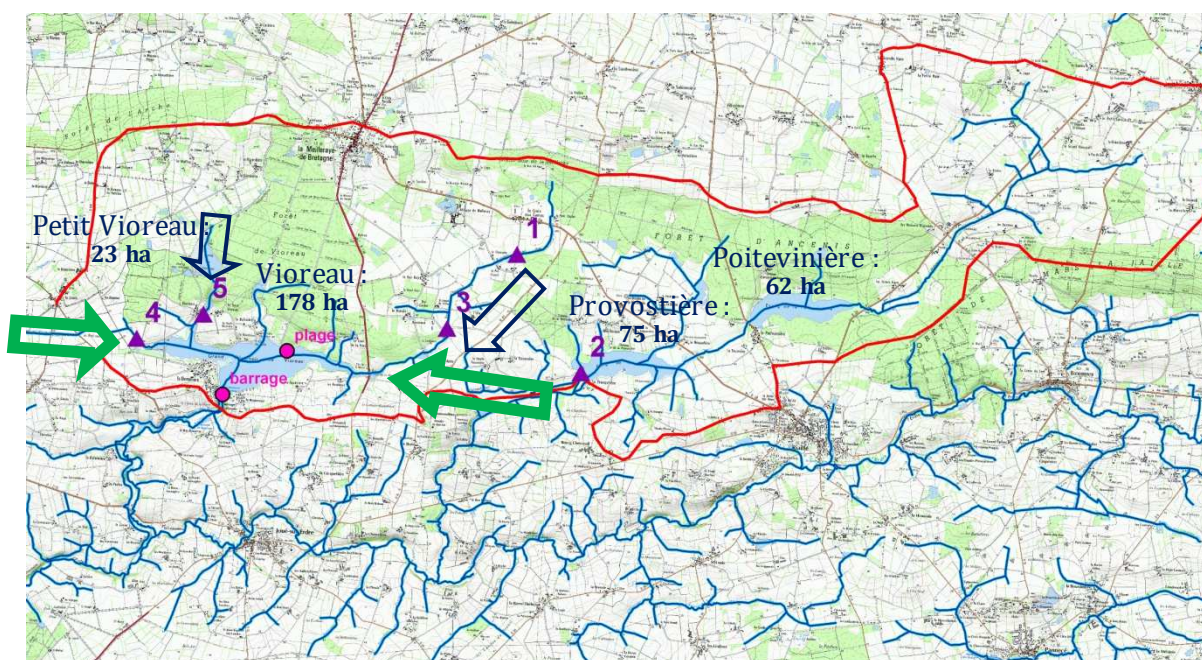


Figure 13 : Réseau hydrographique du secteur d'étude

Selon le fonctionnement routine ou saisonnier des vannages, il apparaît que la taille du bassin versant d'alimentation ne sera pas toujours la même.

La connexion avec les eaux qui auront transité via les 2 étangs de Poitevinière et de Provostière ne sera donc pas systématique.

I.5.3. Les rigoles des Ajots et de l'Isac

Potentiellement, ce sont ces 2 rigoles qui apportent les débits en eau les plus importants.

CANAL DE NANTES A BREST

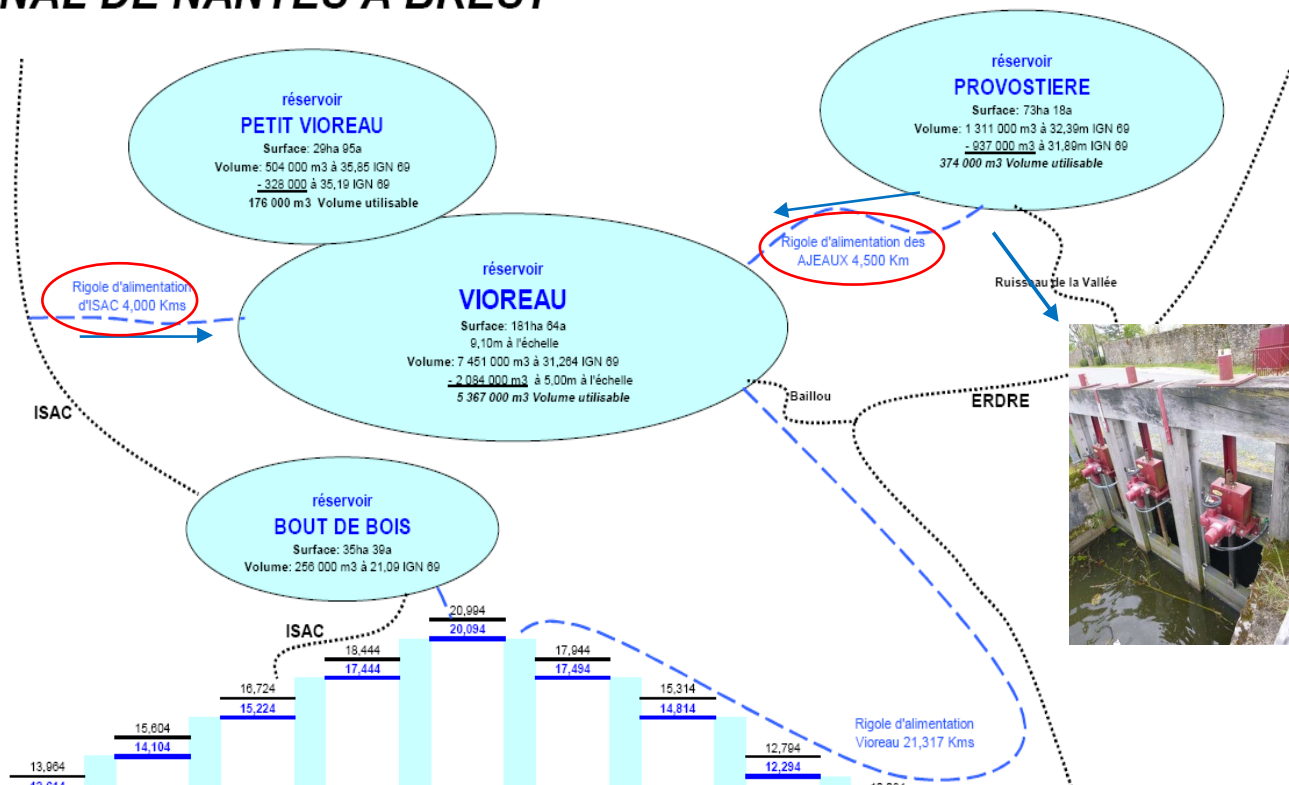


Figure 14 : Principe d'alimentation en eau de Vioreau (CD44)

Cependant la gestion de ces ouvrages a évolué dans le temps (CD44). La connexion de la Provostière n'était pas nécessaire toute l'année, et la majorité des lâchers était orientée vers le ruisseau de la Vallée par un système de 3 vannes automatisées.

L'écoulement actuellement dirigé vers la rigole des Ajots n'est le résultat que d'une fuite sur l'ancienne vanne au niveau de la digue de Provostière.

Finalement, il apparaît que cette vanne n'est plus utilisée depuis 5 ans au minimum, et que la rigole n'est plus réellement étanche.

Un point bas existe sur le tracé de cette rigole, à mi parcours. La vanne de la Blanchetière matérialise ce point bas. Lorsque cette vanne est ouverte, l'eau (fuites de Provostière) rejoint le ruisseau de la Vallée, et non plus Vioreau.

La rigole passe quelques points hauts. La pente de son radeau est quasi nulle, mais doit remonter vers Vioreau. Le point le plus haut (au niveau du lieu-dit les Ajots) a été franchi par la création d'un tunnel de 250 m environ. Mais il faut que le niveau d'eau dans la rigole soit suffisamment haut pour que l'eau atteigne le tunnel et verse ensuite vers Vioreau.

Si le vannage de la Blanchetière est ouvert, le niveau d'eau n'est plus suffisant dans la rigole, et la totalité du débit s'écoulera vers le sud pour rejoindre l'étang sur le ruisseau de la vallée.

Figure 15 : Zoom sur la rigole d'alimentation des Ajots



Fonctionnement actuel:

Le lâcher de Provostière dans la rigole des Ajots n'est plus utilisé dans la gestion des niveaux de Vioreau (sur les 6 dernières années), mais il reste un débit résiduel dû à la fuite de l'ancienne vanne de Provostière. Ce reliquat ne rejoint pas Vioreau car dès le mois de mars la vanne de la Blanchetière est ouverte.

Les eaux du bassin versant de la **Provostière n'atteignent donc plus VIOREAU pour l'instant.**

Le bassin versant théorique du Vioreau voit donc sa surface diminuer de 77,6 à 38,6 km² avec ce dévoiement de l'ensemble du débit de surverse de Provostière dirigé, directement et indirectement, vers le ruisseau de la Vallée, affluent de l'Erdre.

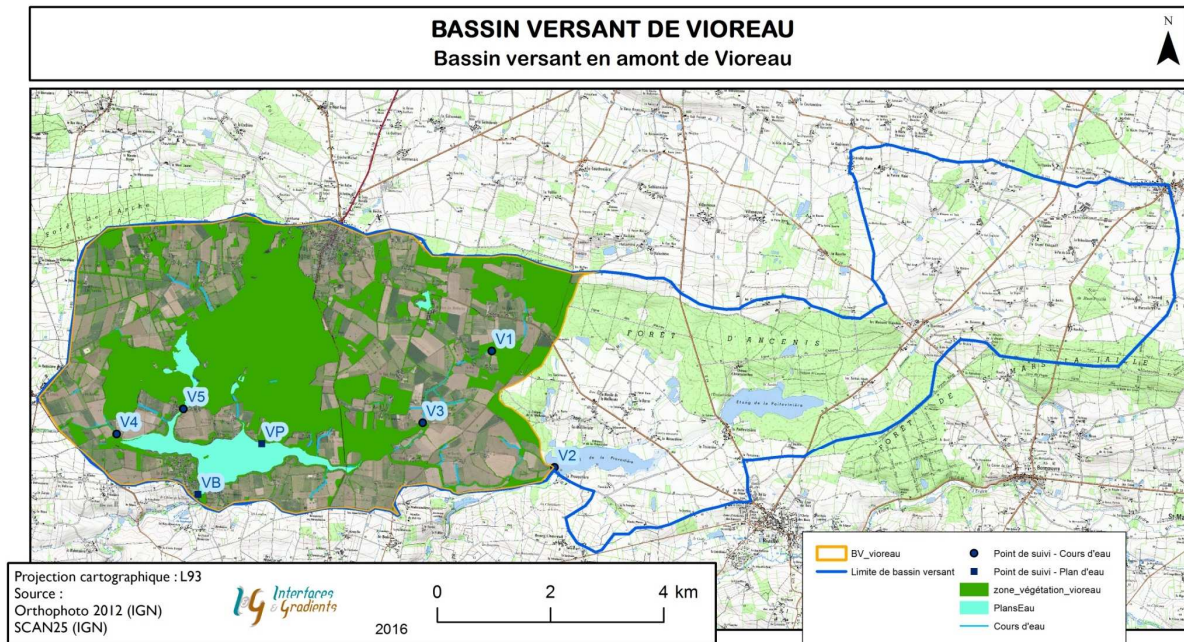


Figure 16 : Diminution sensible du bassin versant d'alimentation de Vioreau

De la même manière, nous avons repris une analyse plus fine de la gestion de la rigole de l'Isac, et de son incidence sur l'alimentation en eaux de VIOREAU.

Cette rigole longue de 4 km assure un écoulement Ouest – Est vers Vioreau (sous-bassin versant de 7,3 km²). La pente du radier est très faible, et certains tronçons sont fortement végétalisés : l'écoulement n'est plus visible en moyennes et en basses eaux.

Par contre, le fonctionnement en hautes eaux ne correspond pas non plus, au schéma de principe (Figure 14), depuis que le vannage a été supprimé depuis de nombreuses années (Photo 3).



Photo 3 : Vue de la jonction entre le ruisseau de l'Estival et la rigole (ancien vannage) de l'Isac

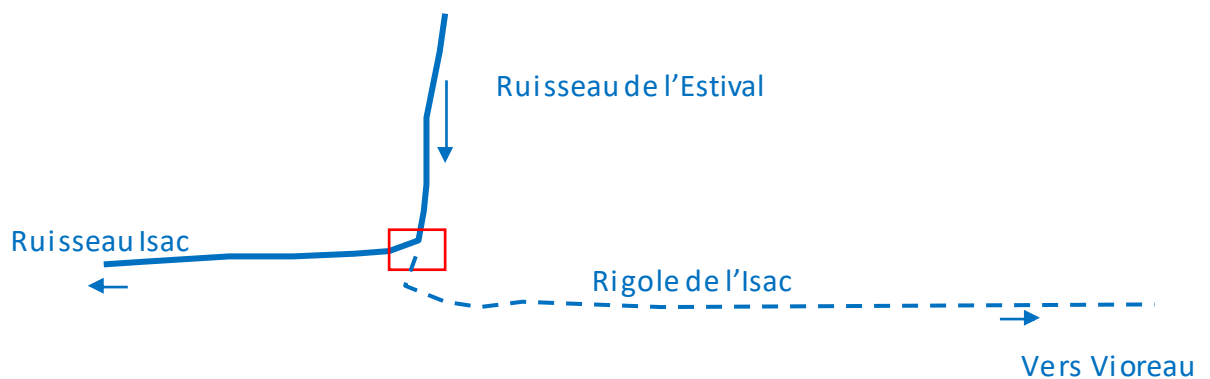


Figure 17 : Répartition des débits au niveau de la jonction entre le ruisseau de l'Estival et la rigole de l'Isac

Sans la vanne perpendiculaire au ruisseau, mais avant le méandre (à angle droit) le débit est dirigé préférentiellement dans la rigole et non l'inverse.

En période de basses eaux le peu d'eau est stagnant dans ces réseaux très peu pentus. En moyenne, et surtout en hautes eaux, le débit est aujourd'hui dirigé vers VIOREAU.

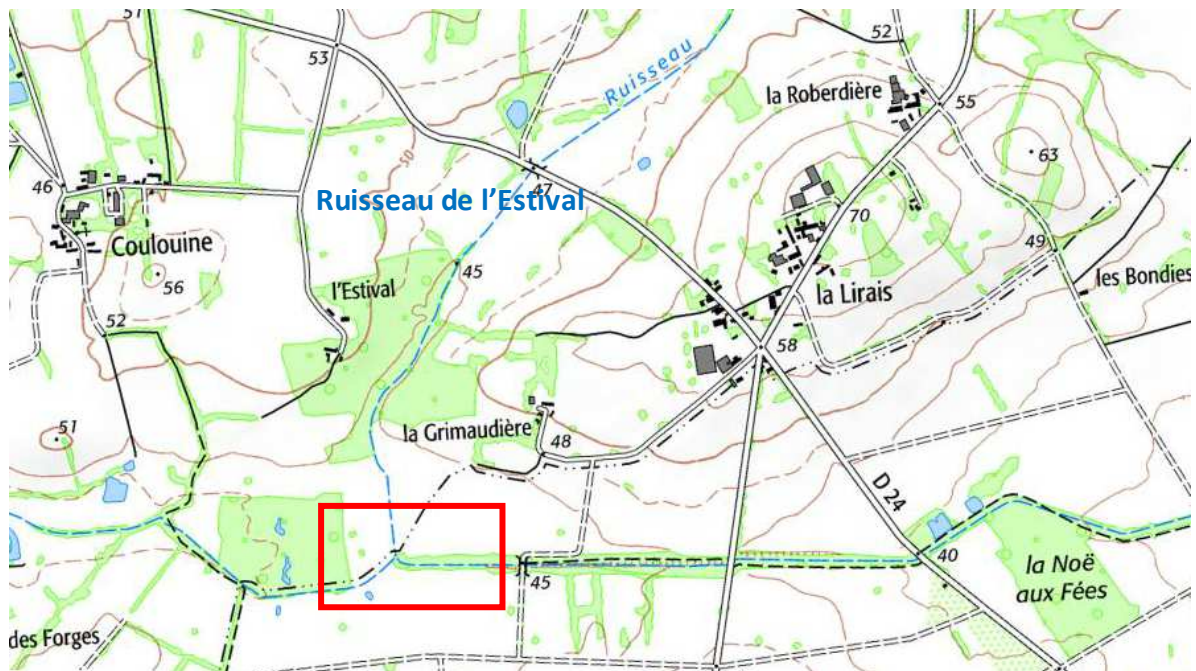


Figure 18 : Localisation de l'ouvrage de vannage de la rigole de l'Isac

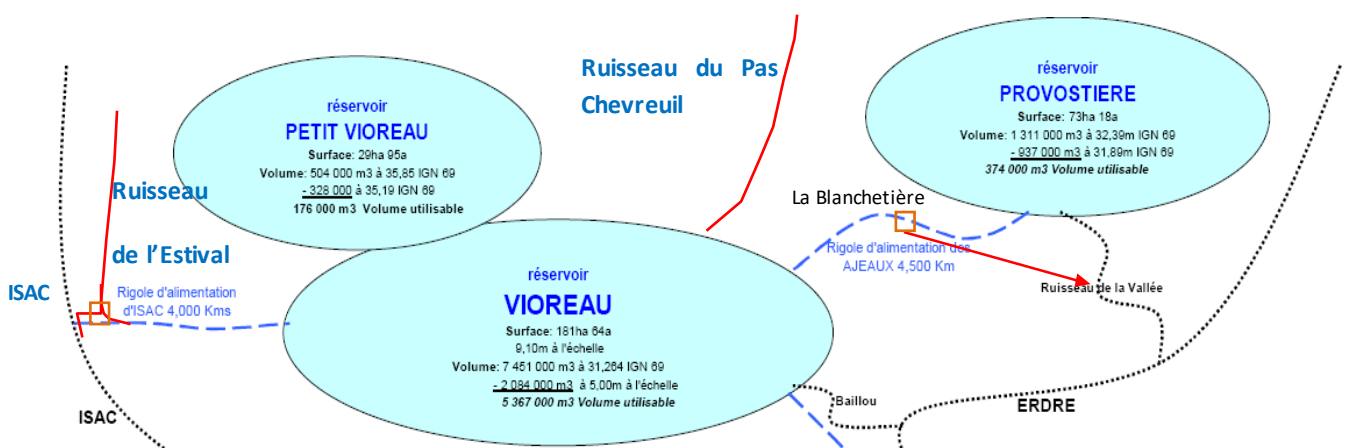


Figure 19 : Actualisations sur le principe d'alimentation et de circulation des eaux superficielles

Le système de « U », glissières destinées à mettre en place des batardeaux existe, et les murets de soutènement sont sains. Cet ouvrage pourrait, si besoin être remis en place pour réguler les débits de cette alimentation Ouest de Vioreau.

I.5.4. Incidences de la gestion hydraulique sur la définition de l'aire d'alimentation du lac de Vioreau

La mise à jour du fonctionnement de l'alimentation en eau de Vioreau conduit à la modification du contour des bassins versants d'alimentation, topographiques et artificiels.

Il faut ajouter la totalité du sous BV de la rigole de l'Isac sur le secteur Ouest, et il faut également retirer les deux sous BV au niveau de la rigole des Ajots et du ru qui dont l'écoulement passe sous cette rigole (en orange ci-dessous).

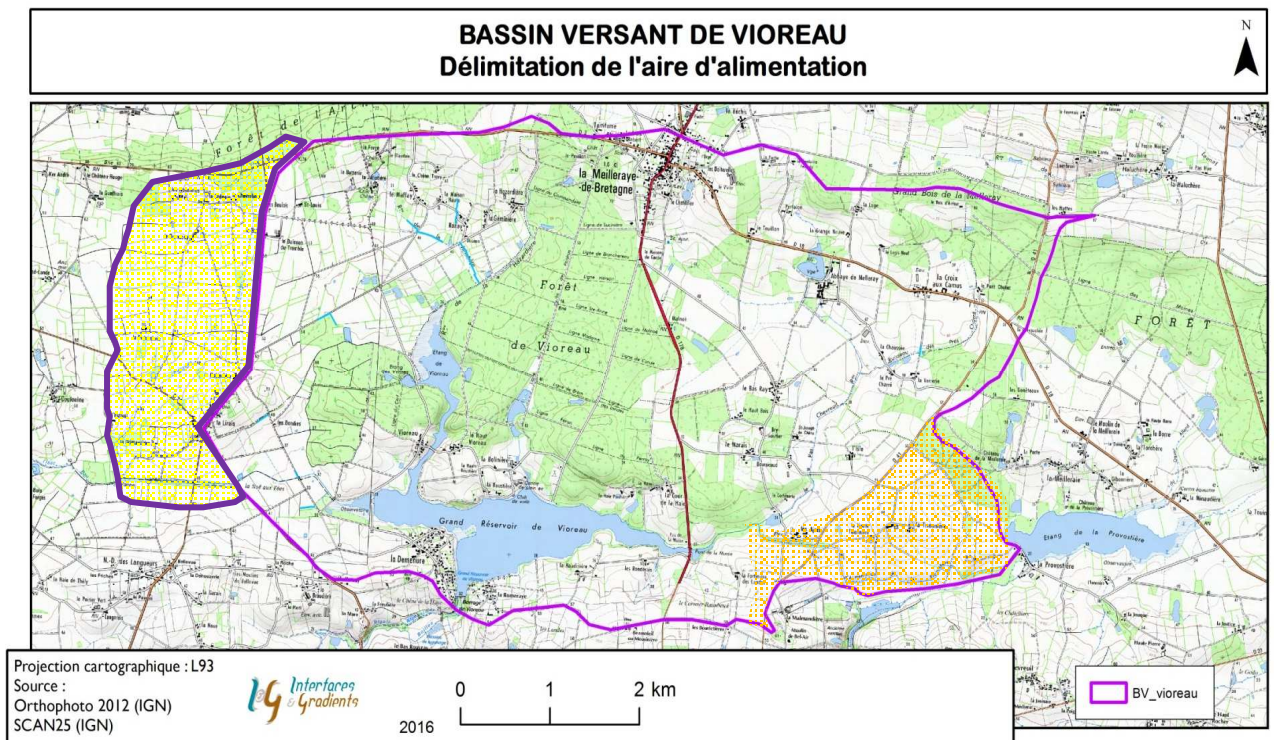


Figure 20 : Diminution sensible du bassin versant actuel alimentant le plan d'eau de Vioreau

Enfin, la surface d'alimentation en eau superficielle de VIOREAU est réduite aujourd'hui à 44,2 km² seulement, et non plus 77,6 km² comme nous l'avions estimé dans un premier temps à partir des données et études récentes.

I.6. Gestion hydraulique du Grand Vioreau

I.6.1. Caractéristiques du plan d'eau

Le grand réservoir de Vioreau présente une superficie de **178 ha**, lors que son taux de remplissage a atteint la cote maximale fixée à **30,90 m NGF** : soit une hauteur d'eau de 9 m représentant un volume de **7,45 Mm³**.

Le barrage est installé sur le cours d'eau du Baillou, à environ 4,5 km à l'amont de sa confluence avec l'Erdre, au lieu-dit "Le Chêne de la Haye".

Le plan d'eau a la forme d'un triangle très aplati dont la pointe la plus courte correspond à la tête de la retenue, au niveau du barrage (Figure 21).

Le Petit Vioreau occupe une surface de 23 ha, pour un remplissage de 0,5 Mm³ à la cote maximale de 35m NGF.



Figure 21 : Vue aérienne du grand réservoir de Vioreau (source Géoportail)

En situation de remplissage maximal, les queues de retenue sont très étendues. Par contre, l'abaissement estival du plan d'eau réduit sensiblement sa surface en eau, notamment au niveau de celles-ci. Cette variation annuelle de la cote de remplissage conduit donc à l'émergence temporaire, en période estivale, d'une vaste surface de berge.

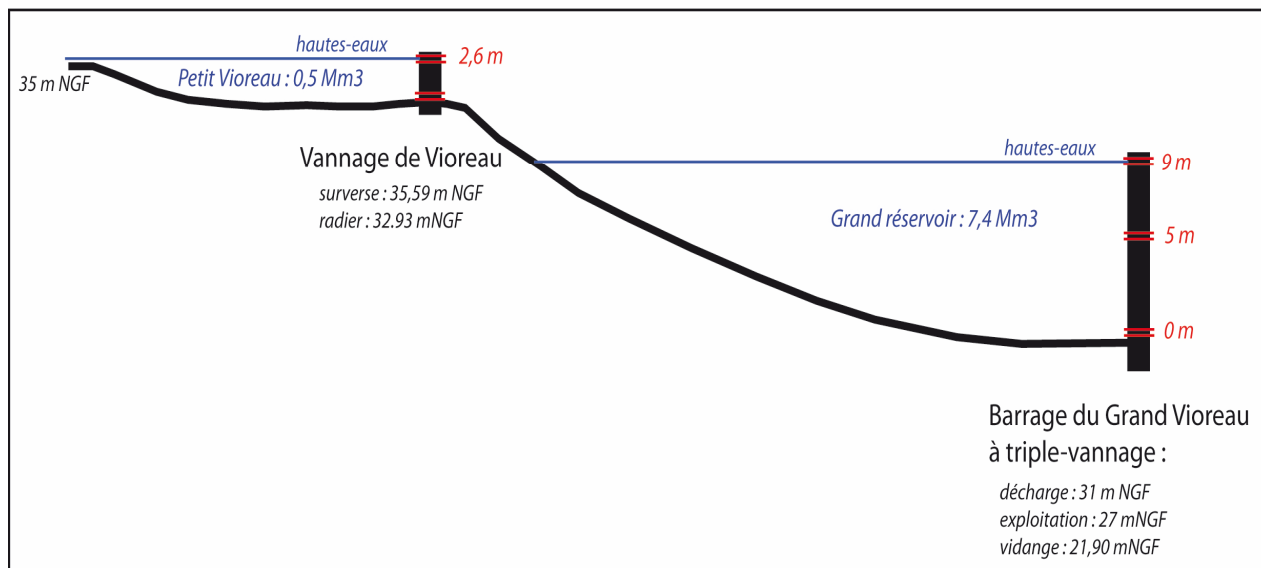


Figure 22 : Caractéristiques des vannages du Petit Vioreau et du Grand Vioreau

Le barrage du Grand Vioreau comporte trois ouvrages hydrauliques :

- un déversoir (évacuateur des crues)
- une vanne de prise d'eau (cote : 27,41 m NGF; volume restant = 2,5 Mm³),
- une vanne de fond (cote : 21,90 m NGF; volume restant < 0,1 Mm³),

Il est constitué de deux murs égaux et symétriques, en maçonnerie ordinaire (Photo 4) qui forment parement à l'aval et à l'amont. L'intervalle entre les deux murs est rempli par un prisme en béton.

Caractéristiques techniques du barrage	
Longueur	131 m
Largeur	7,40 m
Hauteur	13,70 m
Retenue d'eau	9,10 m

Tableau 1 : Chiffres-clés du barrage de Vioreau

La gestion des vannes du Grand Réservoir se fait manuellement par un agent. Une vidange a lieu tous les 10 ans pour inspecter les barrages : la dernière vidange du Grand Vioreau date de 2003. Une nouvelle opération de vidange sera programmée à court terme en 2017-2018.



Photo 4 : Vue du parement aval du barrage de Vioreau (2016)



Photo 5 : Vue du déversoir de crue du barrage de Vioreau (niveau de remplissage maximal)

La gestion de la vanne du Grand Vioreau est fortement dépendante des besoins d'alimentation, via la rigole alimentaire, du canal de Nantes à Brest au cours de la période de navigation (de début avril à fin octobre). Pendant l'hiver, le réservoir de Vioreau est en phase de remplissage.

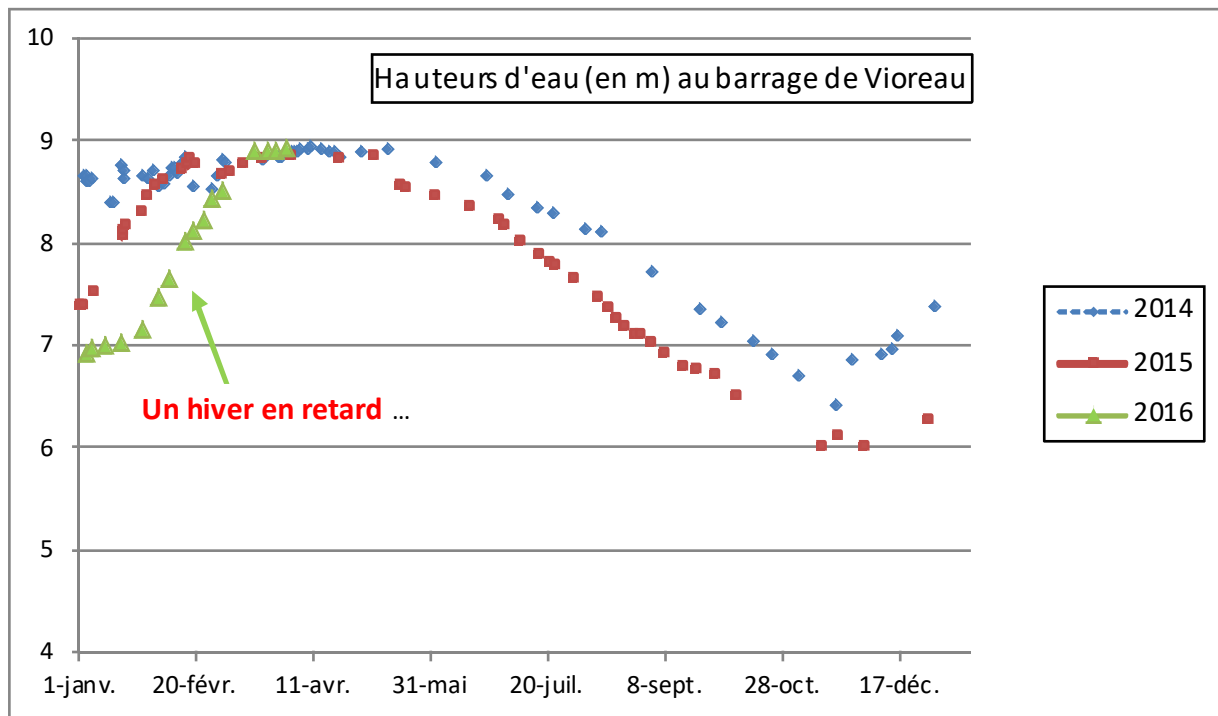


Figure 23 : Suivis journaliers de la hauteur d'eau du Grand Vioreau pour la période 2014-2016

Les suivis journaliers (2014-2016) de la cote du Grand Vioreau se traduisent ainsi par une évolution en cloche asymétrique, avec une période de remplissage resserrée en hautes eaux (décembre-mars), suivie d'une période de décharge étalée entre les mois de mai et de novembre (Figure 23).

Rq : le retour des pluies a été retardé lors de l'hiver 2015-2016 (courbe verte ci-dessus). Malgré la carence en eau en novembre et décembre 2015, le remplissage de la retenue a été relativement rapide dès que les pluies d'hiver ont été efficaces, et la cote maximale a été atteinte au mois de mars, largement avant les besoins en eau du canal.

I.6.2. Les exutoires du Grand Vioreau

En aval, le Grand Réservoir de Vioreau alimente d'une part l'Erdre via le ruisseau le Baillou et d'autre part la rigole alimentaire du Canal de Nantes à Brest. Les trois canaux issus des vannes se jettent dans la carrière (Figure 24), qui comporte un déversoir vers le Baillou (Photo 7) puis l'Erdre, et une vanne pour la prise d'eau vers la rigole alimentaire (Photo 8).

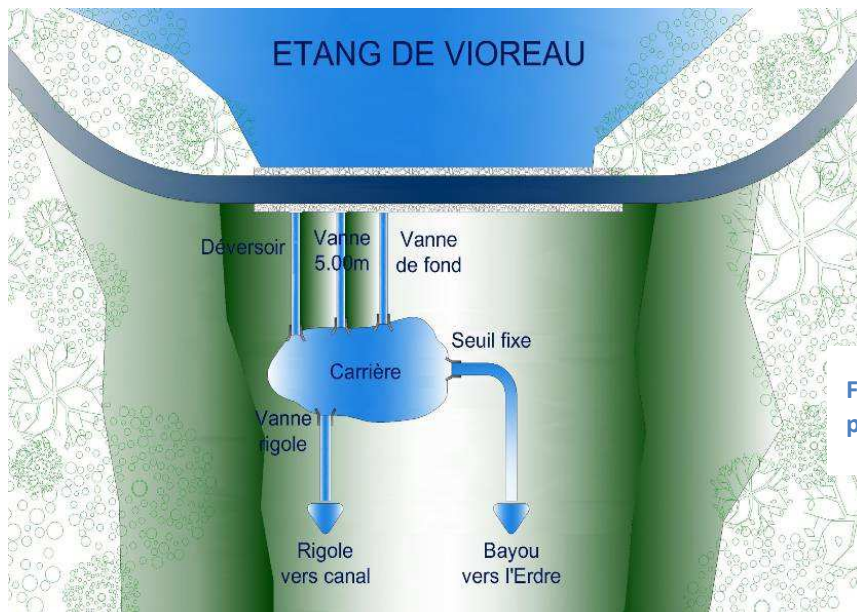


Figure 24 : Gestion hydraulique de la partie aval de Vioreau



Photo 6 : Vue de la carrière recevant les eaux d'évacuation du Grand Vioreau



Photo 7 : Déversoir d'écoulement des eaux de la retenue vers le ruisseau le Baillou



Photo 8 : Une vanne permet la régulation du passage des eaux vers la rigole alimentaire du canal de Nantes à Brest

La rigole alimentaire (Photo 8) est un canal artificiel, creusé parallèlement au cours d'eau le Baillou, puis de l'Erdre, rejoignant finalement le Canal de Nantes à Brest. Sa pente est réglée à 0,14 m par kilomètre. Sa section a la forme d'un trapèze isocèle. Les berges sont principalement constituées de dalles béton.

La rigole passe quatre vallons en viaduc et dans un souterrain sur environ 800 m de longueur.

I.7. L'occupation des sols

Le bassin versant de Vioreau incluant les étangs de Poitevinière, Provostière et Vioreau, et la rigole de l'Isac s'étend sur une surface de 84,9 km². Ce territoire peut être qualifié de mi-rural, mi-forestier.

En effet, le bassin versant est occupé à 43 % par des zones boisées (forêts et boisements) et à 51 % par des terres agricoles (SAU). Les secteurs Nord de Vioreau et de Poitevinière comprennent respectivement les forêts domaniales de Vioreau et d'Ancenis.

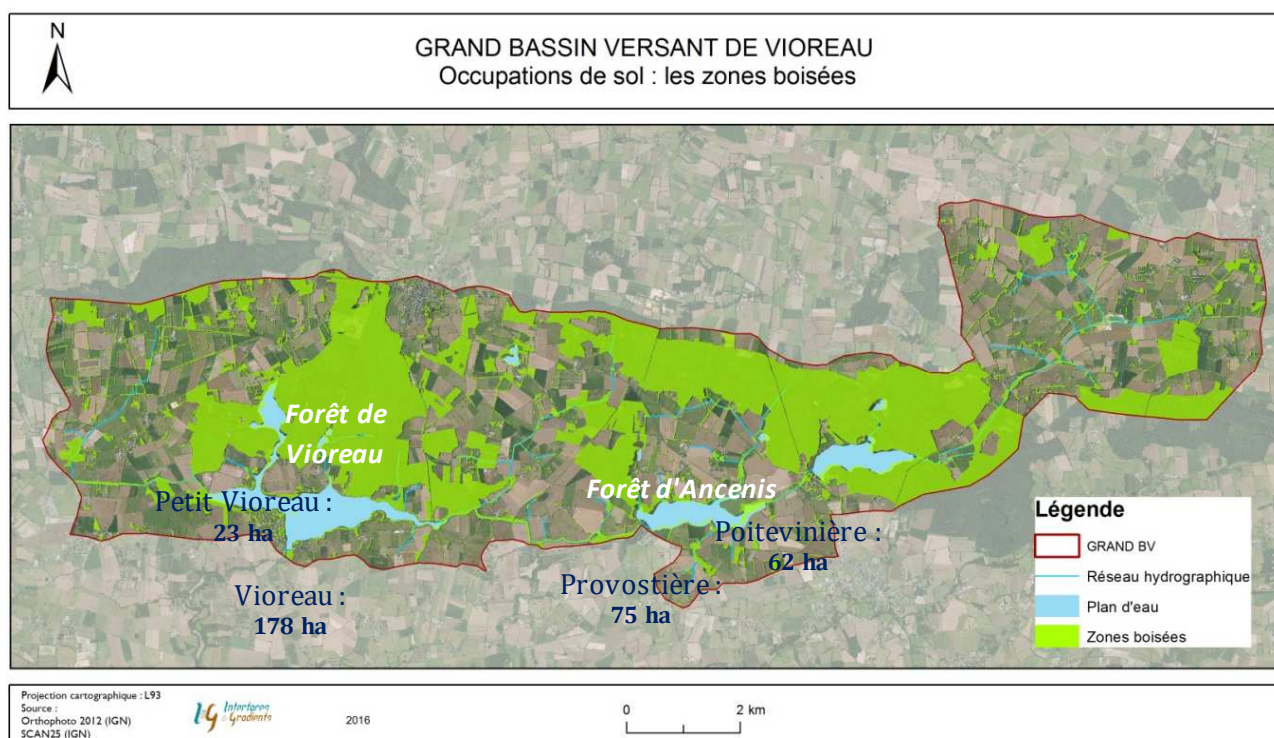


Figure 25 : Les zones boisées (boisements, forêts) du bassin versant de Vioreau

La part de l'étendue des plans d'eau s'élève à 4 % du bassin total : le grand Vioreau à lui seul comptant pour la moitié de ces surfaces en eau. Les secteurs urbanisés sont quant à eux minoritaires (< 1,5 %) : principalement le bourg de la Meilleraye-de-Bretagne.

L'importance des surfaces boisées implique une réduction de la surface agricole utile (51 % de SAU) sur ce bassin versant de Vioreau, comparé à celui de l'Erdre où la part de SAU s'élève à 62 % tandis que la part des boisements chute à 5,5 % (données Edenn).

Les secteurs agricoles du grand bassin de Vioreau présentent une densité de haies bocagères plus élevée par rapport à celle du contexte départemental : 70 ml/ha contre 54 ml/ha en Loire Atlantique (22 020 km de haies répertoriées en 2000).

Le maillage bocager est ainsi particulièrement préservé sur le bassin versant de Vioreau (Figure 26). Les haies bocagères agissent comme des barrières physiques qui limitent voire qui empêchent le transfert de sols au fossé et/ou au réseau hydrographique.

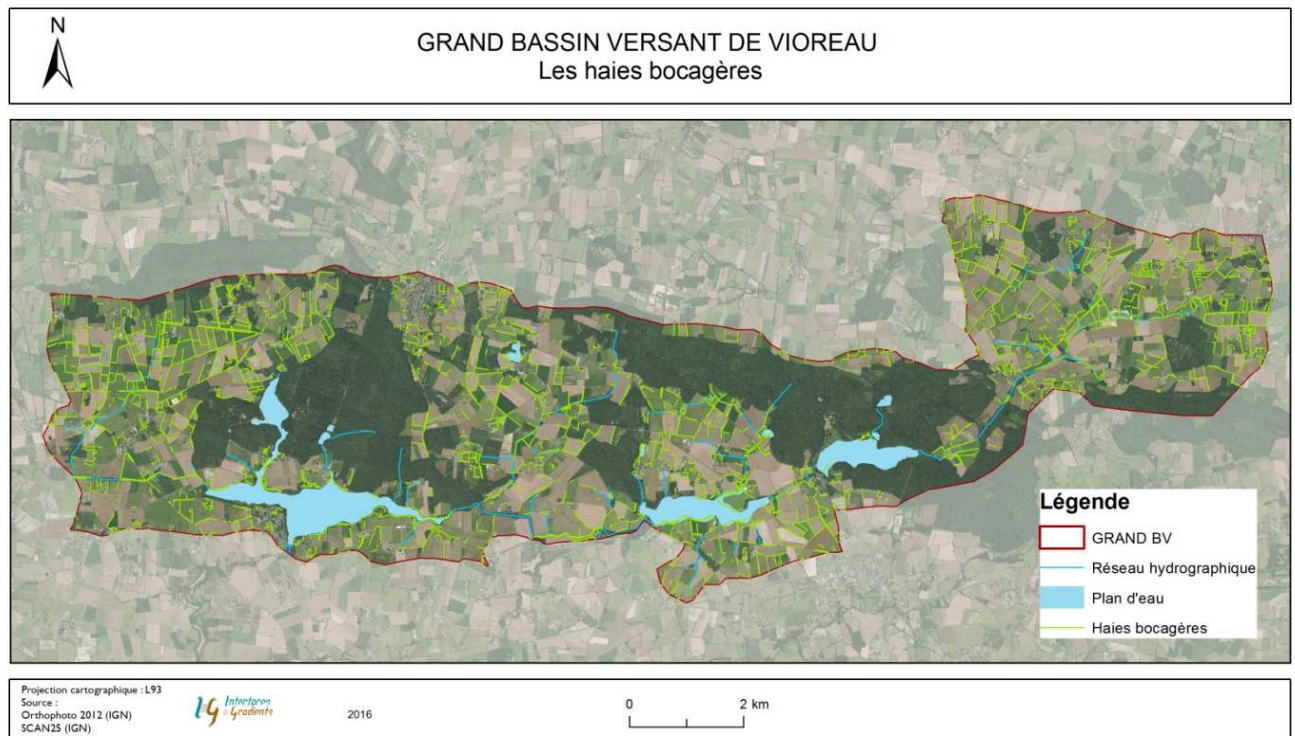


Figure 26 : Les haies bocagères géolocalisées sur le bassin versant de Vioreau

En première approche et sur la base des données existantes, le grand bassin versant de Vioreau apparaît être dans une situation peu favorable à l'érosion et au transfert de particules de sols au réseau hydrographique.

Ces premières données de caractérisation du territoire seront confrontées par la suite de l'étude à de nouveaux éléments acquis sur le terrain lors de la phase diagnostic (2015-2016), afin d'affiner la pression potentielle liée à l'érosion.

I.8. Natura 2000

Le site Natura 2000 "Forêt, Etangs de Vioreau et Etang de la Provostière" n°FR5200628 correspond aux limites de l'étang du Petit Vioreau, de l'Etang de Provostière, du Grand Réservoir de Vioreau et de la rigole des Ajots entre ces deux derniers plans d'eau.

Le site étendu sur quatre communes : Abbaretz, la Meilleraye-de-Bretagne, Joué-sur-Erdre et Riaillé, occupe un linéaire de 10 km pour une superficie initiale de 281 ha.

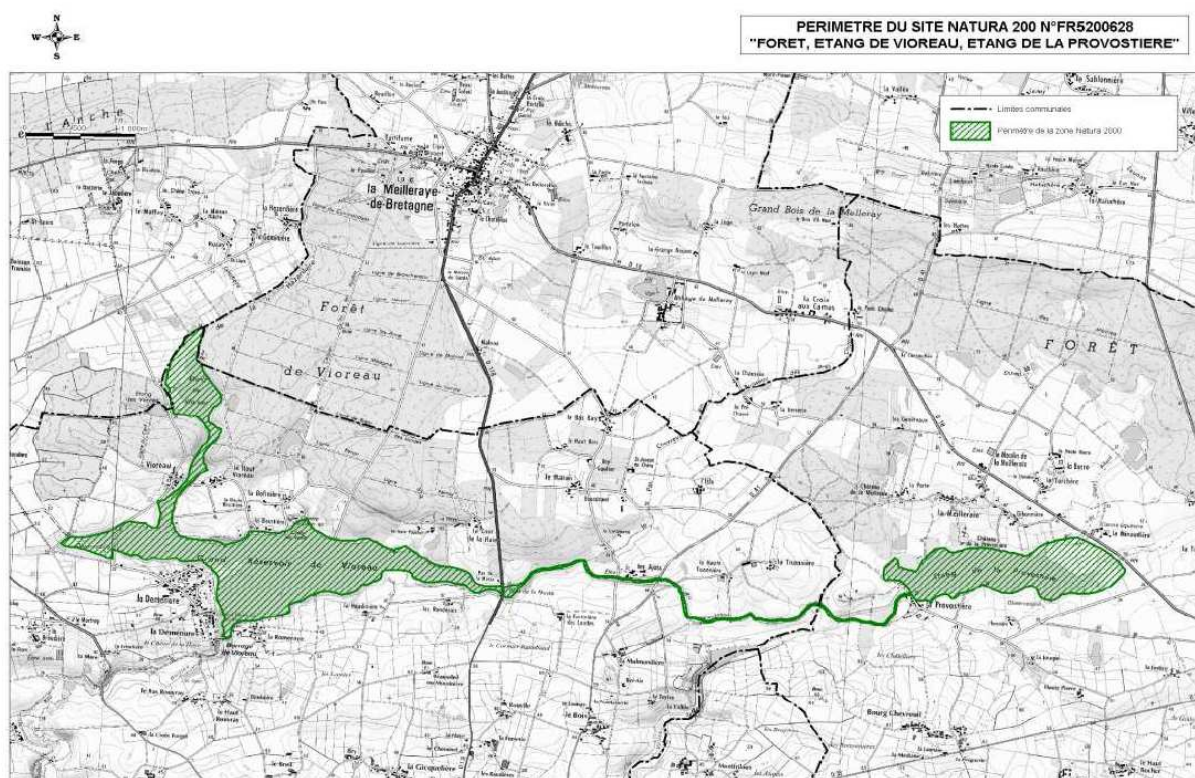


Figure 27 : Périmètre du site Natura 2000 N°FR5200628 "Forêt, Etang de Vioreau, Etang de la Provostière"

Le site de Vioreau est propice au développement du coléanthe délicat, plante protégée en France. C'est la seule station connue en Pays de Loire, où se développe cette petite graminée, qui profite du marnage en fin d'été pour recouvrir sur de vastes étendues, les grèves de l'étang mises hors d'eau.

Les modalités de gestion hydraulique du secteur doivent tenir compte des exigences du coléanthe délicat : cette espèce a besoin au minimum, d'une exondation de 30 jours entre la semaine 36 (mi-septembre) et la semaine 43 (fin octobre) pour effectuer son cycle de développement.

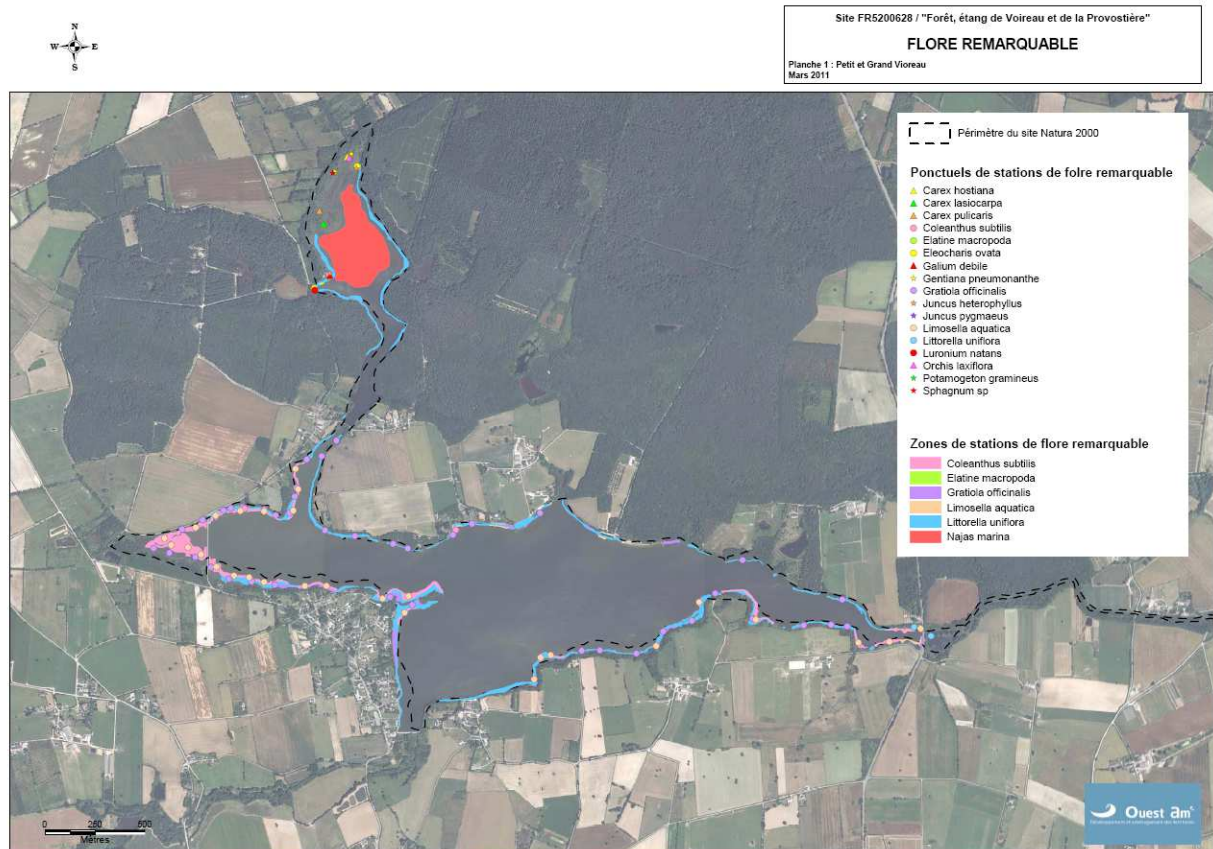


Figure 28 : Localisation de la flore remarquable identifiée sur le secteur de Vioreau (source EDENN)

Sept autres espèces d'intérêt communautaire floristique (Flûteau nageant- *Luronium natans*) et faunistique (dont la Loutre d'Europe, les chiroptères) sont recensés sur le site Natura 2000. Quatre habitats d'intérêt communautaire (milieux aquatiques et tourbeux) dont un prioritaire (Saulaie à saule blanc) ont été cartographiés sur l'étang de Vioreau et ses bordures.

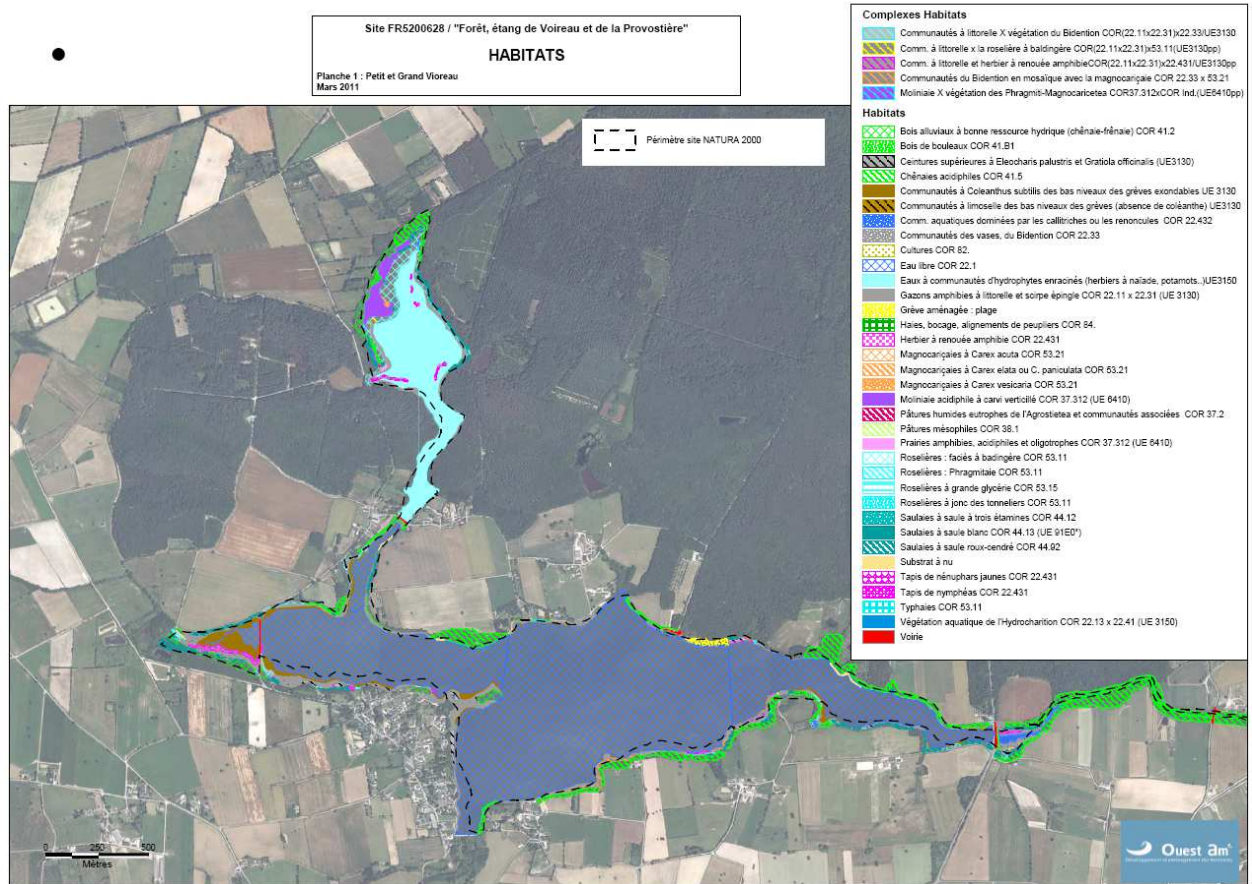


Figure 29 : Cartographie des habitats recensés sur le secteur de Vioreau (source EDENN)

La dégradation des eaux du Vioreau nuit à l'atteinte du bon état de conservation des habitats d'intérêt communautaire inscrits dans le DOCOB (DOCUment d'OBjectifs) du site Natura 2000 "Forêt, Etangs de Vioreau et de la Provostière", validé en 2011.

II. Synthèse et valorisation des données de la qualité de l'eau existantes

II.1. Le suivi de la qualité du Grand Vioreau : réseau départemental

L'évolution de la qualité des eaux du Grand Vioreau est surveillée au point de suivi 04146570, localisé entre la plage et la base nautique. Ce point appartient au réseau de surveillance de la qualité des eaux superficielles de la Loire-Atlantique.

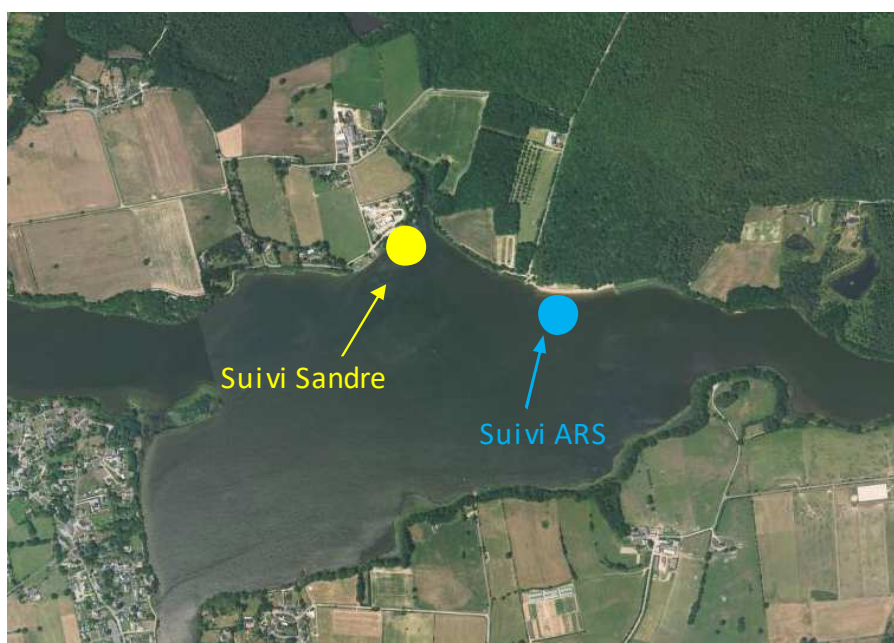


Figure 30 : Localisation des stations de suivis de la qualité du Grand Vioreau

- **Paramètre phosphore**

La fréquence d'analyses du paramètre phosphore est faible : 6 prélèvements par an. Les résultats de ces campagnes organisées tous les deux mois montrent que le niveau moyen de la concentration en phosphore avoisine 50 μg de Ptotal/l (Figure 31). Ce niveau de concentration suffit cependant à qualifier le plan d'eau de Vioreau d'eutrophe.

Les pics de phosphore enregistrés s'élèvent jusqu'à 100 μg /l, principalement lors de la période estivale, sauf pour le pic relevé en décembre 2009.

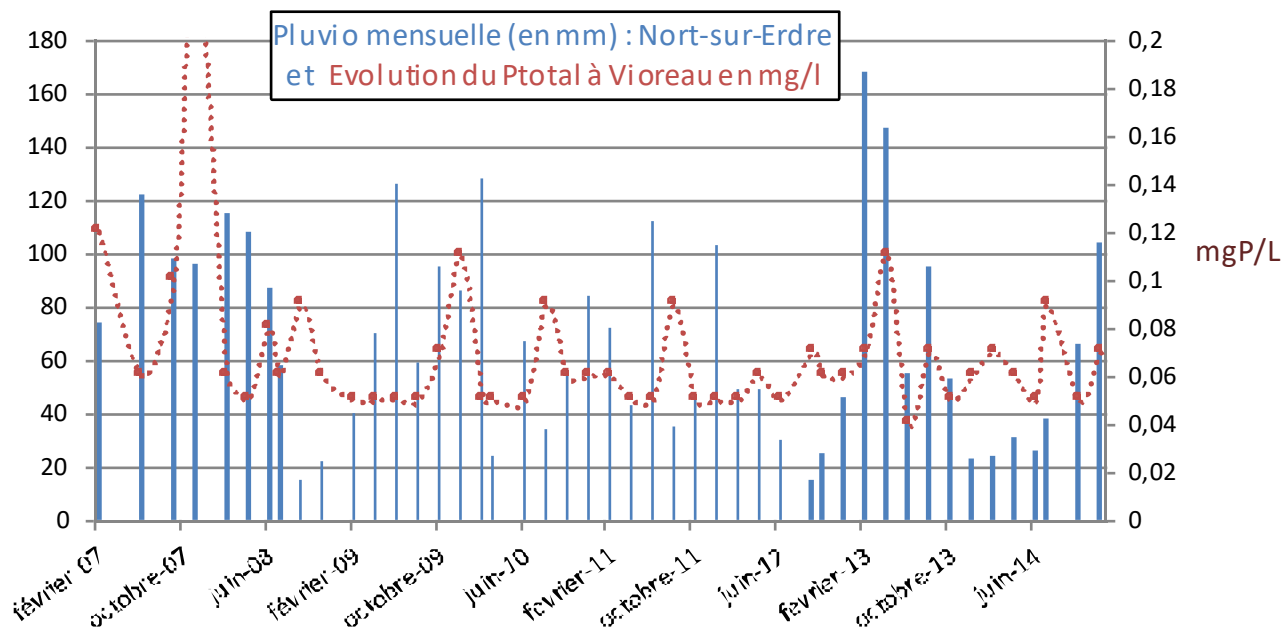


Figure 31 : Evolution de la concentration en phosphore total (6 analyses/an) dans le Grand Vioreau et pluviométrie mensuelle cumulée (station météo de Nort-sur-Erdre)

L'évolution comparée du phosphore total avec le phosphore soluble ne traduit pas une signature urbaine, c'est-à-dire liée à des rejets : la part des ortho-phosphates est faible. La phase dominante du phosphore se trouve sous la forme particulaire. Les pics estivaux de Phosphore coïncident avec des pics de MES qui correspondent certainement aux développement de microalgues.

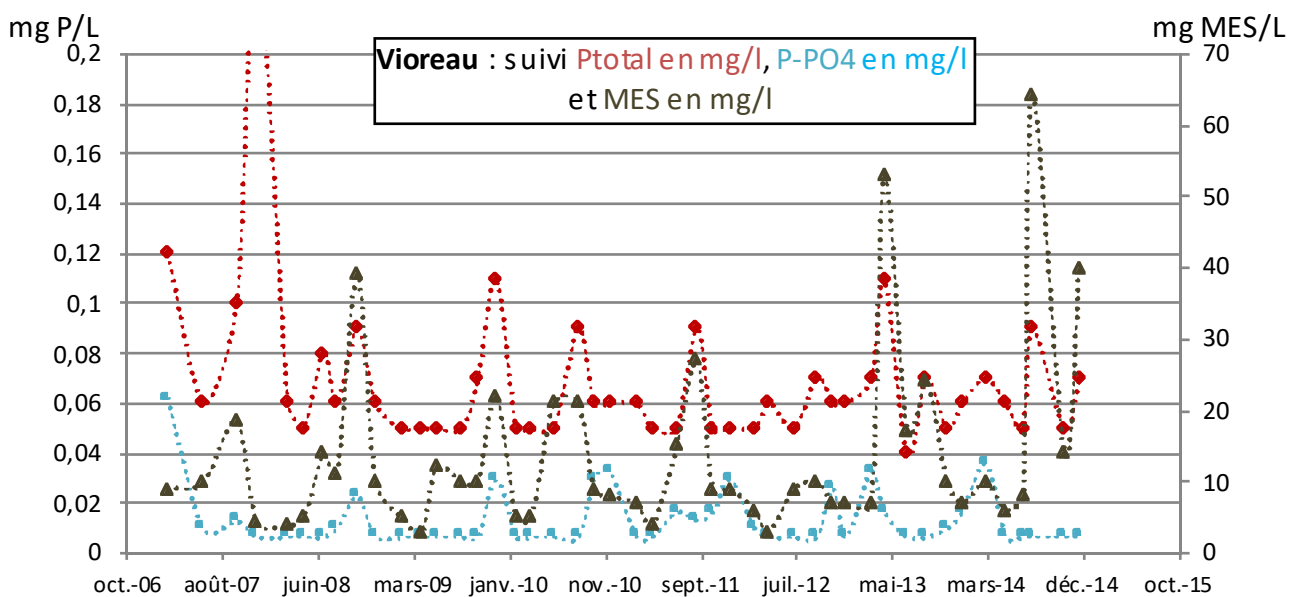
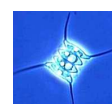


Figure 32 : Evolution comparée des concentrations en phosphore total, en orthophosphates et en matières en suspension dans le grand Vioreau



La comparaison des concentrations en chlorophylle a avec les MES et le phosphore total confirme que les pics estivaux de phosphore total sont liés à la présence de populations algales dans la colonne d'eau (Figure 33).

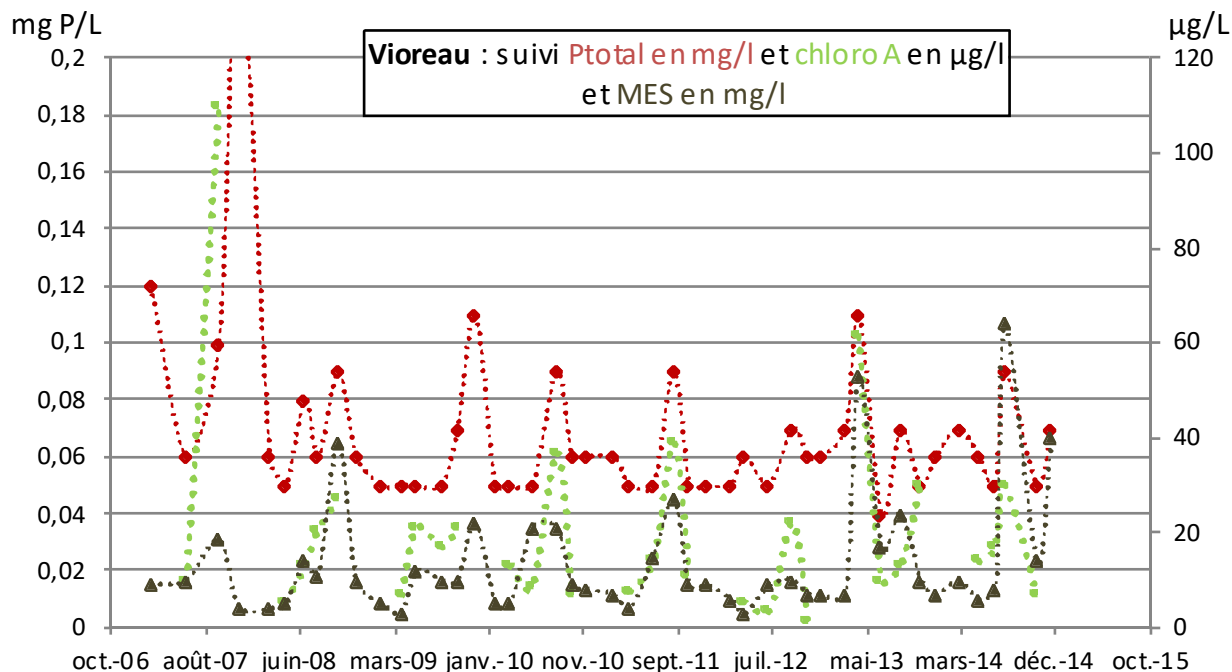
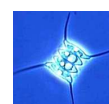


Figure 33 : Evolution comparée du phosphore total, des MES et de la chlorophylle a

Ce sont les algues qui stockent le phosphore (du sédiment et de la colonne d'eau) qu'elles ont assimilé dans ce plan d'eau. Elles se déplacent alors avec une réserve potentielle de phosphore disponible à nouveau lorsque ces algues mourront au cours de leur déplacement vers le barrage.

- Rq : Pour caractériser le type de signature lié au Phosphore, il est indispensable de suivre simultanément ces trois paramètres : le phosphore total, les ortho-phosphates et les matières en suspension. Ils permettent d'identifier le type de caractère du bassin versant (urbain, rural ou mixte) et également le type de sources du Phosphore à rechercher (une source ponctuelle liée à des rejets, ou une source diffuse liée à l'érosion des terres agricoles).



II.2. Les autres réseaux de suivi : Provostière et Poitevineière

Des données de suivis de la qualité des étangs de Provostière et de Poitevineière sont disponibles sur la période 2006-2015. L'échantillonnage a été réalisé tous les deux mois.

Les valeurs de la concentration en phosphore total s'échelonnent de 50 à 160 µg/l pour Provostière (Figure 34) : les pics de Ptotal sont estivaux et dépassent aisément les 100 µg/l jusqu'en 2012. Tout comme Vioreau, le niveau d'eutrophisation de Provostière implique des blooms estivaux de cyanobactéries.

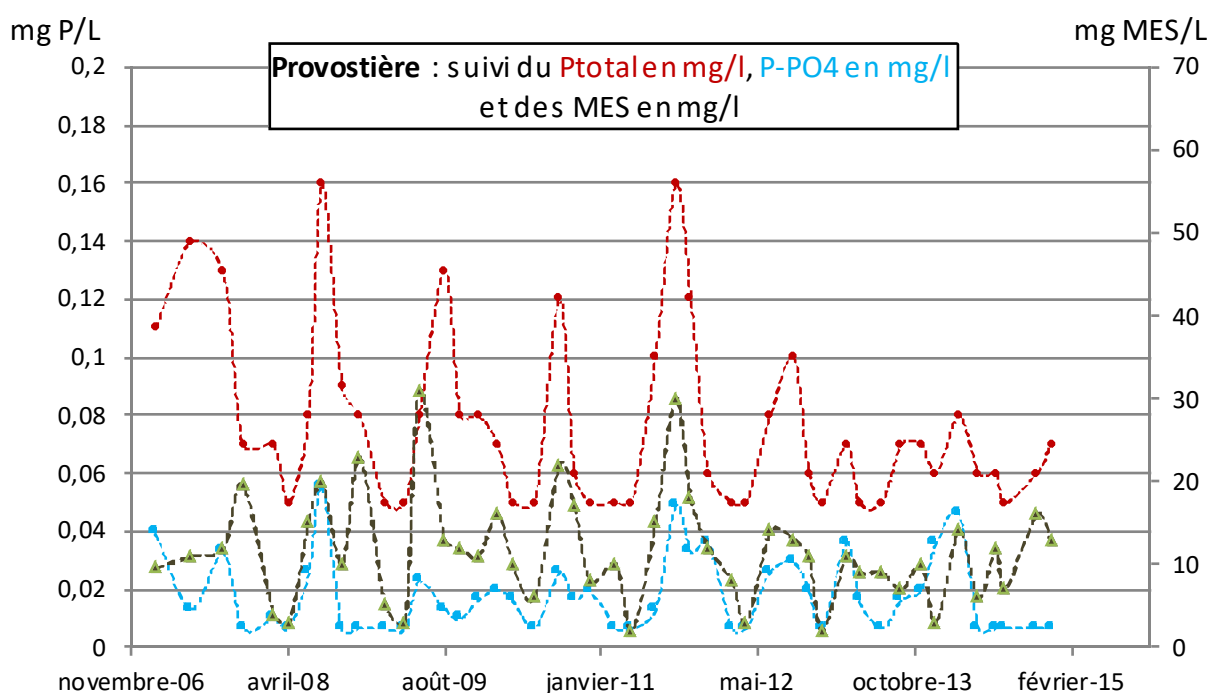
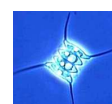


Figure 34 : Evolution comparée des concentrations en phosphore total, en orthophosphates et en matières en suspension dans l'étang de Provostière

L'évolution de la qualité des eaux de l'étang de Poitevineière est semblable à celles de Provostière et de Vioreau. Les pics estivaux de Phosphore total sont récurrents et élevés: les ortho-phosphates y sont très minoritaires car le phosphore de l'eau est dans les algues (Figure 35), jusqu'en 2012.



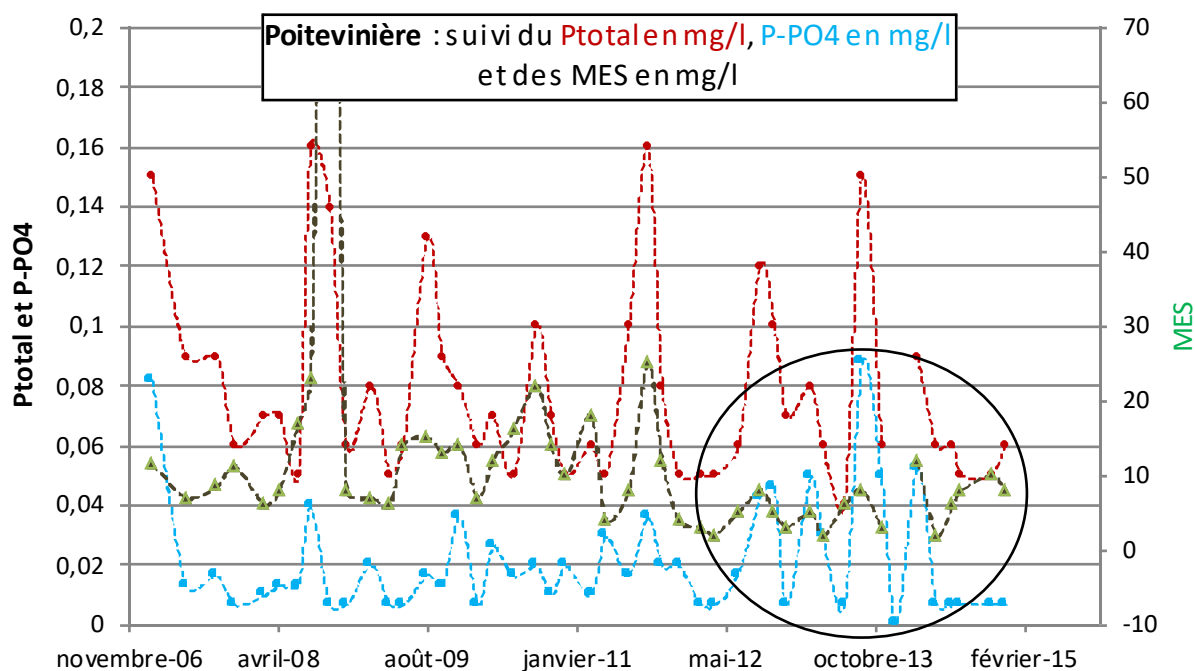
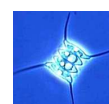


Figure 35 : Evolution comparée des concentrations en phosphore total, en ortho-phosphates et en matières en suspension dans l'étang de Poitevière

A partir de 2012, la qualité chimique de Poitevière semblerait évoluer : les concentrations en ortho phosphates sont sensiblement plus fortes.

La concentration en P-PO₄ s'est élevée jusqu'à 88 µg/l en août 2013 : elle constitue environ 60 % du phosphore total, traduisant un apport de PO₄.

- L'ensemble des données historiques de la qualité des eaux de surface est focalisé sur les 3 plans d'eau en série (Poitevière, Provostière et Vioreau). Si l'exploitation de ces données a permis de confirmer le statut trophique des masses d'eaux, aucune information ne permet de caractériser les eaux en provenance de leurs bassins versants d'alimentation.



II.3. Le suivi sanitaire estival des eaux de baignade de Vioreau

L'une des principales caractéristiques des plans d'eau eutrophes (bien nourris) est l'importance de la biomasse planctonique rencontrée pendant la saison estivale, conséquence de la richesse en nutriments de ces milieux. Quelque soit la famille d'algues considérée, toute prolifération mérite en soit un intérêt particulier : une production de phytoplancton implique en effet que le milieu est capable de fournir les nutriments nécessaires, mais également qu'il va devoir stocker la matière organique produite et composer avec les conséquences de son recyclage (consommation d'oxygène, relargages et production de nutriments...).

Parmi l'ensemble des familles présentes, les Cyanobactéries constituent une source de préoccupation fréquente, notamment en raison des risques potentiels (allergènes ou toxiques), et de la sensibilisation croissante des usagers aux problèmes de santé publique.

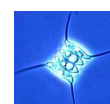
La nécessité de caractériser le niveau de population des Cyanobactéries a conduit dès 1999 l'OMS à établir une classification en 3 niveaux, reprise par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France en 2003 puis par la Direction Générale de la Santé pour définir les seuils de vigilance dans le cadre du contrôle sanitaire des eaux de loisirs.

Densité cellulaire	Niveau OMS	Recommandations
< 20000 cell/ml	1	Aucune (qualité satisfaisante)
20 à 100 000 cell/ml	2	Précautions élémentaires et information des usagers
>100 000 cell/ml	3	Activités restreintes ou interdites, selon la concentration en toxines
>100 000 cell/ml et écume ou mousse en surface		Activités interdites

Tableau 2 : Correspondance des niveaux d'alertes de l'Organisation Mondiale de la Santé et du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France

En pratique, il faut reconnaître que compte-tenu des densités de cyanobactéries rencontrées dans les retenues eutrophes de l'Ouest, le seuil des 100 000 cell/ml est très bas donc très fréquemment atteint et correspond, en fonction des espèces présentes, à :

- *Planktothrix agardhii*: environ 1000 filaments/ml, soit 1 filament pour 1 mm³
- *Aphanizomenon flos-aquae*: environ 200 filaments/ml, soit 1 filament pour 5 mm³
- *Microcystis* et *Worochinia*: environ 100 colonies/ml, soit 1 colonie pour 1 mm³



Ces densités n'ont visuellement aucun impact sur la turbidité ou la couleur de l'eau, et il est quasiment impossible pour un opérateur non entraîné de distinguer de visu la présence de Cyanobactéries dans l'eau, ce qui contribue certainement à retarder le transfert d'information et l'adaptation des usages.

Lors des épisodes de prolifération, certaines espèces sont capables de produire des toxines en quantités suffisantes pour constituer un danger pour les humains et les animaux. Plusieurs facteurs peuvent favoriser leur prolifération: la température de l'eau, l'ensoleillement, les précipitations, l'agitation du milieu, les éléments nutritifs (azote et phosphore)... Un plan d'eau eutrophe, calme, chaud et ensoleillé en plein été est un milieu idéal pour la prolifération des Cyanobactéries.

En période estivale, un suivi sanitaire de la qualité des eaux de baignade (plage de Joué-sur-Erdre) est réalisé par l'ARS. L'historique de ces suivis, depuis 2004, montre que la présence de Cyanobactéries dans la zone de baignade est avérée et récurrente depuis les premières recherches en routine.

Au cours des 11 premières années de suivi de 2004 à 2015, des dépassements du niveau 3 OMS (> 100 000 cell/ml) ont été observés quasiment chaque année, à l'exception de 2007 et 2014. Les fréquences d'observation des seuils d'alerte OMS ont été synthétisées dans la Figure 36 et comparées, sur la même période, à la distribution observée en Bretagne et Mayenne.

A la plage, les dépassements du niveau 1 (>20 000cell/ml) sont observés chaque année. Le passage au-delà du niveau 3 (> 100 000 cellules/ml) peut être observé 9 années sur 11, et s'étendre sur plus de la moitié de la période estivale, comme ça a été le cas de 2008 à 2013.

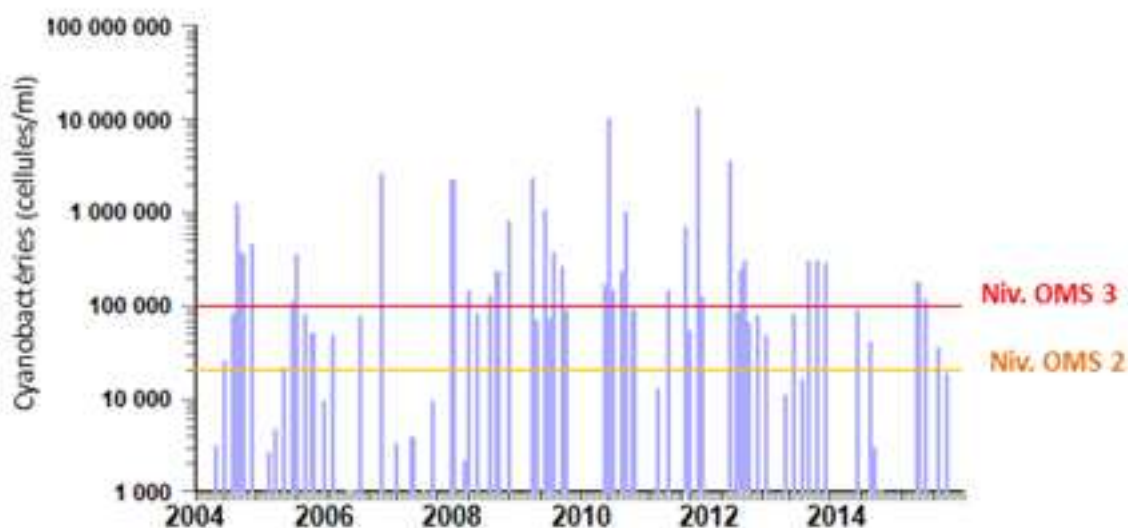
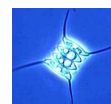


Figure 36 : Effectifs de cyanobactéries dans les eaux du lac de Vioreau (2004-2015)



Globalement, moins d'un quart des échantillons (23 %) présentait des concentrations cellulaires inférieures au seuil de niveau 1 OMS. Les niveaux intermédiaires représentaient 30 % des observations. Enfin 47 % des analyses se situaient au-dessus du seuil de niveau 3.

En comparaison avec les autres baignades suivies à l'échelle de la Bretagne (Figure 37), pendant la même période 2004-2014, les dépassements du seuil de niveau 3 OMS étaient observés dans 24 % des points suivis dans l'ensemble de la Région, alors que le niveau 1 était majoritaire avec 52 % des analyses.

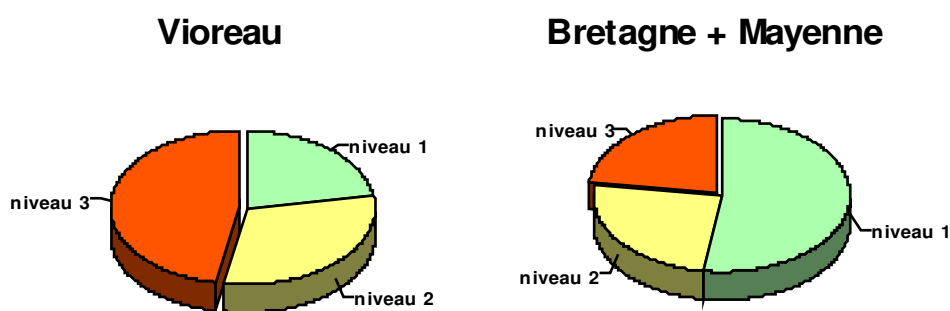


Figure 37 : Fréquence de distribution des seuils d'alerte OMS dans le lac de Vioreau entre 2004 et 2015

Le lac de Vioreau présente une situation originale par rapport aux plans d'eau de Bretagne-Mayenne. Ainsi, si on représente la durée annuelle des dépassements du seuil de niveau 3 OMS en fonction des densités cellulaires maximales (Figure 37), les épisodes de dépassement les plus importants atteignaient des durées qu'on peut estimer entre 8 et 11 semaines pour une saison sanitaire de 16 semaines, pour des effectifs de cyanobactéries relativement plus élevés que la moyenne.

La "montée en puissance" des cyanobactéries y apparaît donc plus rapide que dans les autres lacs, puisque sinon les densités cellulaires observées devraient se traduire par des durées de présence plus longues, de l'ordre de 16 semaines. Cette dynamique particulière peut être expliquée par des facteurs locaux aggravant la situation, et particulièrement le régime des vents qui sera étudié plus en détail dans le chapitre suivant.

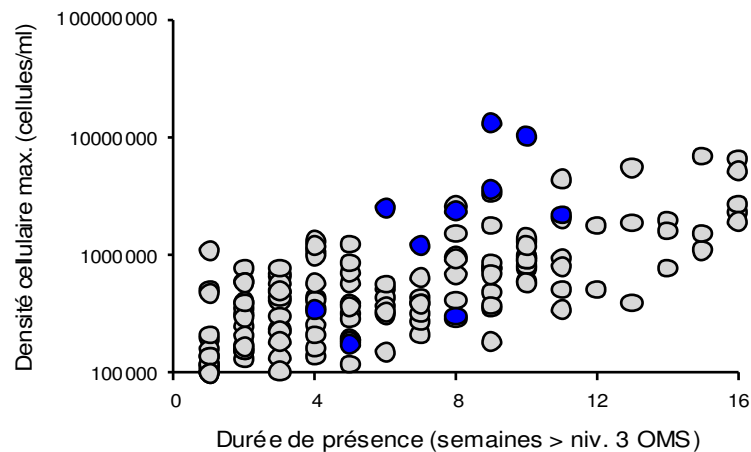
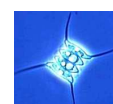


Figure 38 : Relation entre durée de dépassement et densité cellulaire maximale dans les baignades de Bretagne-Mayenne et le lac de Vioreau (en bleu) entre 2004 et 2015

Les différentes espèces de cyanobactéries rencontrées dans le Vioreau peuvent être rassemblées en 5 groupes distincts. Les 3 premiers groupes sont constitués d'espèces connues comme potentiellement toxiques. Les représentantes de ces 3 groupes apparaissent dans 50 à 67 % des échantillons selon les taxons, et constituent en moyenne plus de 99 % des effectifs et de la biomasse. Les espèces productrices potentielles de Microcystines sont présentes en moyenne dans 58 % des échantillons (pour plus de 99 % des effectifs), alors que les productrices d'autres toxines sont observées dans 56 % des cas, pour atteindre 10 % des effectifs et 12 % de la biomasse.

- **Les Chroococcales des genres *Microcystis* et *Woronichinia*** sont rencontrées dans les conditions extrêmes des gradients climatiques de l'Ouest : dans les zones les plus chaudes, sèches et ensoleillées (*Microcystis*) ou à l'inverse les plus fraîches, humides et peu ensoleillées (*Woronichinia*). Productrices potentielles de Microcystines, et fréquemment impliquées dans les proliférations où des toxines sont détectées, elles sont principalement représentées par les *Woronichinia*, présentes dans 67 % des échantillons pour 90 % des effectifs et 88 % de la biomasse observés.

- **les Nostocales des genres *Aphanizomenon* et *Anabaena*** sont courantes, et présentes dans respectivement 64 et 56 % des échantillons. Elles constituent en moyenne 1 à 1.5 % des effectifs et 1 % de la biomasse des cyanobactéries. Ces genres sont connus pour héberger de nombreuses espèces productrices potentielles de plusieurs familles de toxines, dont les Microcystines, Anatoxines, Saxitoxines et dérivés, Cylindrospermopsines... Elles tendent à préférer les eaux chaudes et les ensoleillements intermédiaires à élevés, ce qui explique leur présence importante en 2015 et 2016.



- Les **Oscillatoriales** du genre *Planktothrix* (*P. agardhii* notamment), bien que présentes dans 51 % des échantillons, ne constituent en moyenne que 0.1 % des effectifs et de la biomasse. Productrices potentielles connues de Microcystines et pour certaines espèces d'Anatoxine, elles tendent à préférer les eaux chaudes, turbides, et les éclaircissements réduits qui se rencontrent aussi bien les années défavorables (ensoleillement faible) que les années clémentes (ensoleillement élevé + eau turbide). Dans le Vioreau elles n'ont jamais atteint un niveau significatif depuis 2004.

- Les deux derniers groupes sont constitués de mélanges d'espèces, des **petites Chroococcales** (*Aphanocapsa*, *Aphanothece*, *Merismopedia* etc...) et des **Oscillatoriales** (*Limnothrix*, *Planktolyngbya*, *Pseudanabaena*, *Phormidium*...). Elles-ci sont en général des espèces benthiques vivant à la surface des sédiments du lac, et qu'on va retrouver dans la masse d'eau les années où les perturbations sont fréquentes (remises en suspension des vases, batillage...). Elles ont en commun d'être des espèces de petite taille à fort taux de croissance, ce qui leur permet d'atteindre rapidement des densités cellulaires élevées sans pour autant constituer une biomasse importante : au total elles étaient rencontrées, depuis 2004, dans moins de 30 % des échantillons pour constituer moins de 0.1 % des effectifs et de la biomasse.

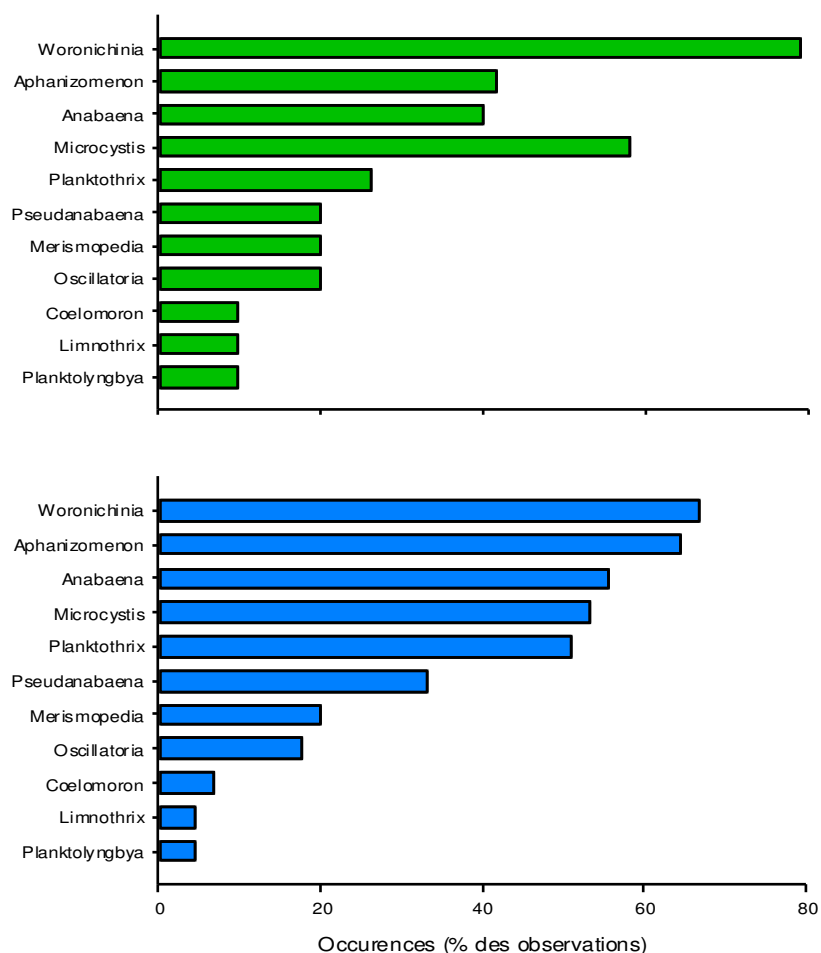
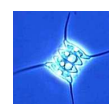


Figure 39 : Fréquence d'observation et contribution aux effectifs des taxons observés dans le Vioreau (2004-2015)



II.4. Fonctionnement du lac de Vioreau : mise en perspective avec les lacs suivis par l'AELB (banque OSUR)

A partir des éléments disponibles dans la base OSUR de l'Agence Loire-Bretagne (AELB), les principales caractéristiques du lac de Vioreau ont été comparées à un ensemble de 48 lacs situés en Centre-Limousin et en Bretagne-Pays de Loire, intégrant donc des contextes géochimiques et eutrophes similaires et bien décrits. Ces éléments synthétiques nous ont apporté les premières indications sur le fonctionnement de la masse d'eau.

• Qualité des eaux :

Tout d'abord, on peut noter (Figure 40) que la charge organique de la masse d'eau du Vioreau est relativement élevée. Constituée par les formes organiques de l'azote et du carbone (NTK et COT), elle représente essentiellement la production interne du lac pendant la belle saison, c.a.d. les nutriments stockés sous forme de biomasse planctonique.

En comparant les différents groupes de lac, il apparaît que la masse d'eau est plus proche des lacs bretons, moins profonds et de plus faible volume, que des lacs du Centre et Limousin, généralement stratifiés et de volume plus important. De la même façon, les concentrations en phosphore total sont situées à la limite des deux groupes: plus élevées que la majorité des lacs du Centre, mais là encore dans la moyenne des plans d'eau bretons

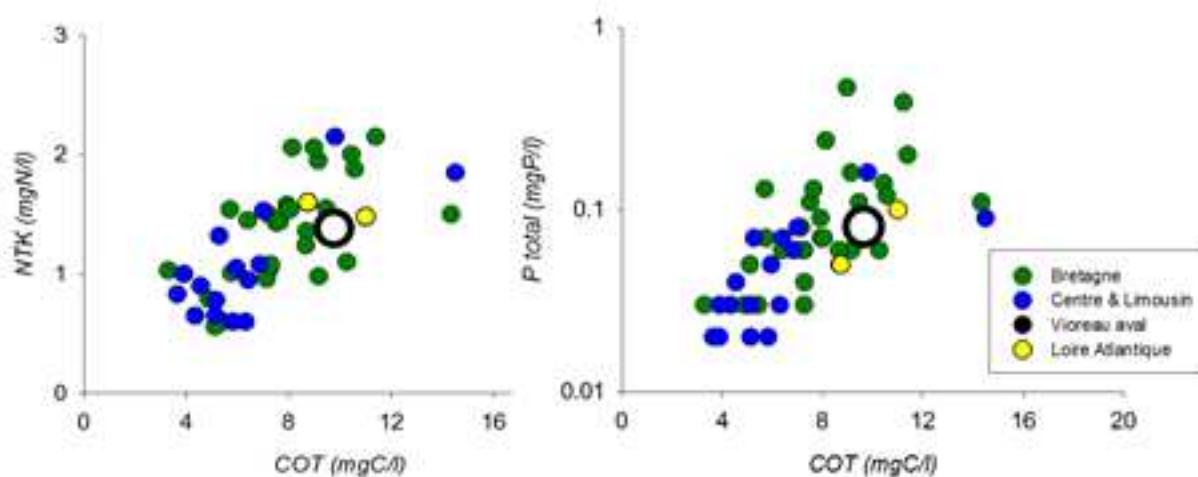


Figure 40 : Etat trophique (azote, phosphore, carbone) des eaux des lacs suivis par l'AELB

Compte-tenu des concentrations relevées en NO_3 et PO_4 , la disponibilité des nutriments ne paraît poser aucune limitation pour la croissance de la biomasse, et le rapport entre azote et phosphore indique un milieu particulièrement favorable aux proliférations de

cyanobactéries. Le Vioreau est ainsi au 12^{ème} rang sur 56 lacs en termes de biomasse de phytoplancton, matérialisée par les teneurs en chlorophylle A.

Ce classement est d'ailleurs élevé, il s'agit des concentrations les plus importantes pour cette gamme de teneurs en P total: les valeurs de chlorophylle A attendues dans ce contexte sont comprises entre 10 et 20 µg/l, et les 19 µg/l mesurés en moyenne dans le Vioreau confirment que peu de facteurs limitants interviennent sur la croissance de la flore planctonique. Alimenté par des eaux provenant essentiellement de massifs schisteux, les eaux du Vioreau sont en outre riches en fer, soufre, et autres oligo-éléments indispensables au développement des algues.

• **Qualité des sédiments :**

Par rapport à la masse d'eau, les sédiments du Vioreau sont relativement pauvres en azote (*NTK*), en phosphore total (*Ptotal*) et en carbone organique total (*COT*) en comparaison (Figure 41) avec les lacs profonds et stratifiés (ex : Centre et Limousin), et correspondent à des valeurs moyennes comparés aux lacs trop peu profonds pour être stratifiés (ex : Bretagne et Mayenne). Ces sédiments sont donc principalement de nature minérale et montrent une faible accumulation de matière organique, ce qui peut indiquer soit une production interne de biomasse relativement faible (ce qui est démenti par les taux de chlorophylle A), soit un recyclage de la matière organique relativement rapide. Or un recyclage rapide suppose une eau chaude et non stratifiée, ce qui va à l'encontre de l'image de lac profond généralement attribuée au Vioreau.

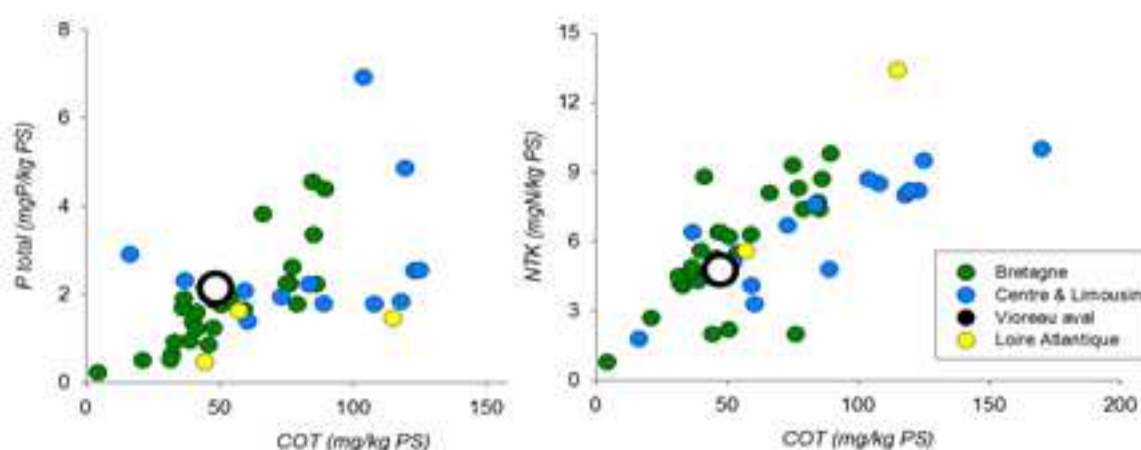
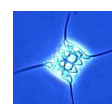


Figure 41 : Etat trophique (azote, phosphore, carbone) des sédiments des lacs suivis par l'AE LB

• **Bilan :**

Le lac de Vioreau apparait donc en position intermédiaire entre deux groupes de lacs très différents: les lacs de plaine du grand Ouest, peu profonds, non stratifiés, de faible volume et fréquemment eutrophes, et les lacs du Centre-Limousin, profonds, stratifiés, de grand volume, et dont les eaux de surface sont en général de bonne qualité. Les lacs les plus profonds, stratifiés en permanence pendant l'été, tendent à piéger les nutriments dans les sédiments et à ne pas les restituer à la masse d'eau (stratification thermique : peu d'échanges fond-surface), d'où des eaux pauvres en nutriments et en biomasse. Les retenues peu profondes et déstratifiées, en revanche, tendent à restituer en permanence les nutriments des vases vers la masse d'eau (par recyclage, diffusion et relargage), ce qui permet d'alimenter en continu la production de biomasse algale et de cyanobactéries.

La position intermédiaire du Vioreau est ainsi explicable par sa morphologie : suffisamment profond pour être stratifié (ce qui devrait le protéger des dégradations), son orientation par rapport aux vents dominants et sa cuvette très évasée permettent des déstratifications fréquentes. Celles-ci en retour assurent le mélange des eaux profondes et de surface, accélérant le recyclage de la matière organique et la réalimentation de la flore en nutriments.



III. Le suivi complémentaire 2015-2016

L'impact du bassin versant sur le fonctionnement du Lac de Vioreau nécessitait de connaître la qualité des eaux superficielles des bassins versants amont. Le suivi complémentaire des différentes signatures des sous bassins versants a été mis en place entre juin 2015 et août 2016, intégrant une campagne en hautes eaux.

III.1. Les conditions hydrologiques du suivi

Démarré en juin 2015, le suivi s'est poursuivi en basses eaux. La période d'étiage s'est exceptionnellement prolongée jusqu'au mois de décembre 2015 : les débits des cours d'eau étaient très faibles et le niveau des nappes souterraines "anormalement" bas (Figure 42).

Une seule campagne a donc été réalisée au cours de l'été 2015 car les ruisseaux étaient à sec.

La reprise des débits est tardive, et n'est observée qu'avec le retour des fortes précipitations (cumul supérieur à 150 mm). Cette importante pluviométrie a eu pour conséquence une reprise des débits ainsi que de la recharge des eaux souterraines locales (exemple à Nort-sur-Erdre). Cependant, cette arrivée tardive des hautes eaux, sur des sols en cultures et des fossés enherbés, se traduit par l'absence de phénomènes d'érosion (observations intensifiées lors de la reprise des pluies).

Il n'y a pas eu de départ de sol du bassin versant, et la campagne hivernale a été déplacée également car elle n'apportait pas d'information supplémentaire.

Le printemps 2016 et le début de l'été, humides, ont enregistré des pluviométries moyennes. Les débits des ruisseaux étaient déjà faibles.

La période de tarissement a été à nouveau précoce.

Cette présence sur les cours d'eau a surtout permis de comprendre le fonctionnement réel de l'alimentation de Vioreau et rapidement de recentrer les efforts de caractérisation de l'eau sur le lac lui-même.

Finalement, 4 campagnes sur les 6 programmées ont été réalisées, en partie à cause des conditions hydrologiques rencontrées entre 2015 et 2016.

Les années hydrologiques 2014-2015 et 2015-2016 sont déficitaires, et font suite à 2 années humides.

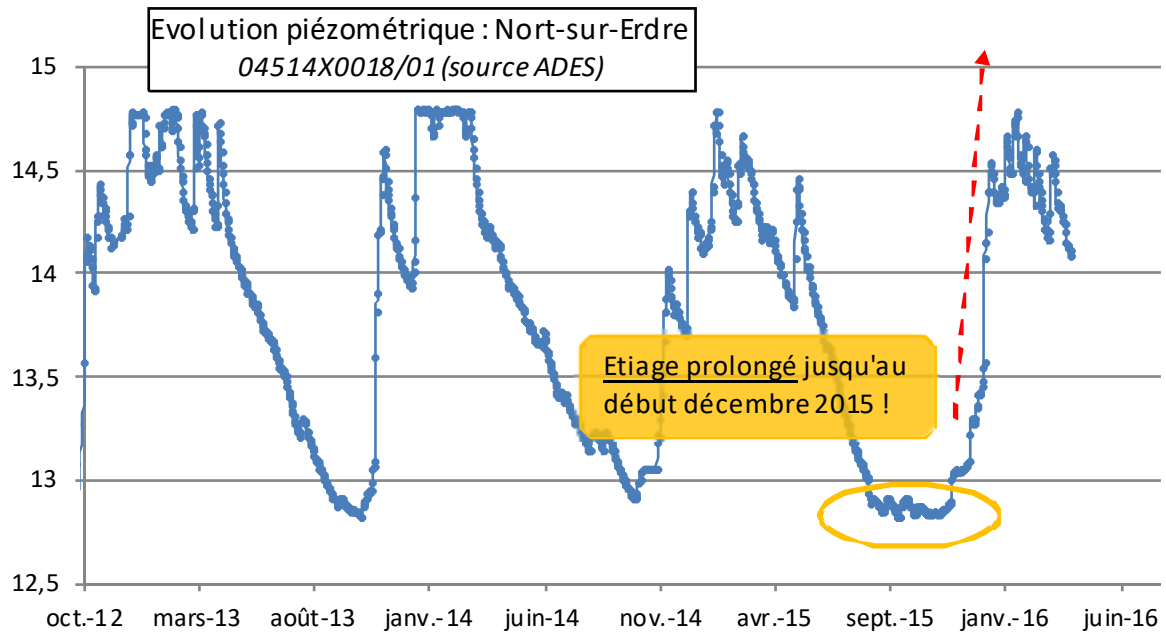


Figure 42 : Evolution piézométrique journalière à Nort-sur-Erdre sur la période 2012-2016 (source ADES)

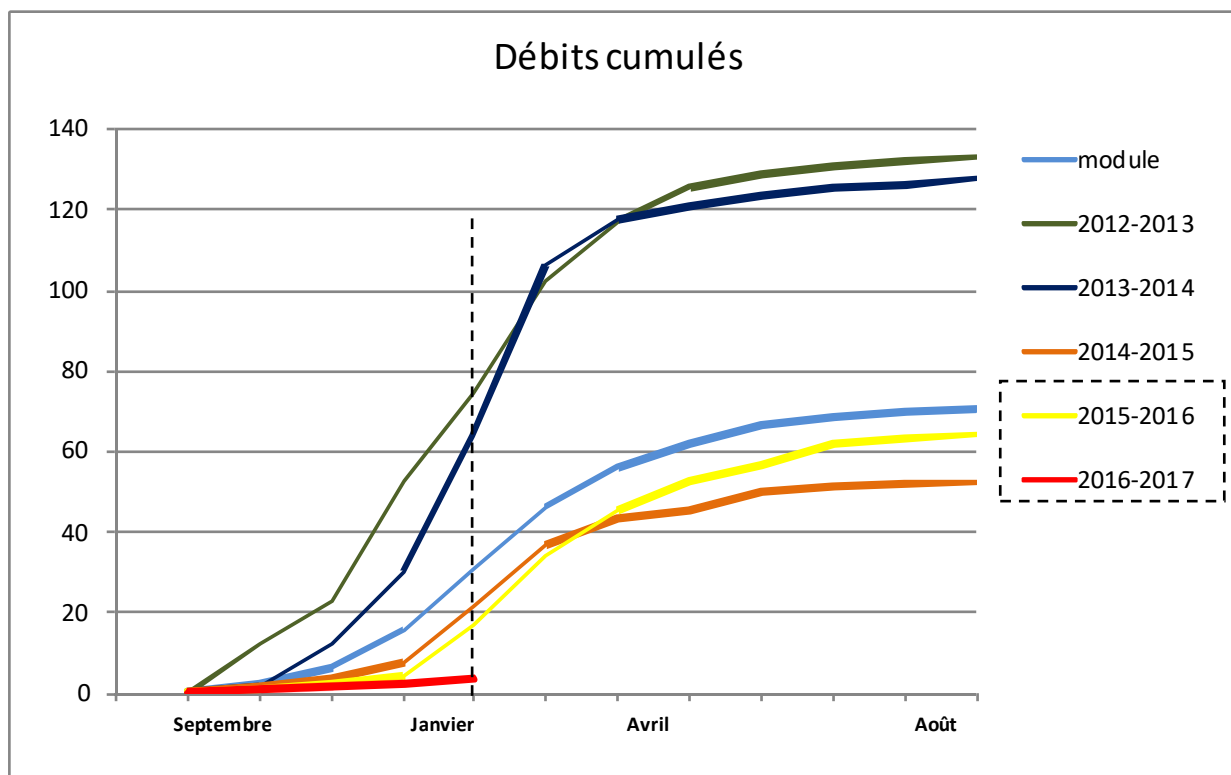
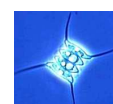


Figure 43 : Débits cumulés de l'Erdre amont, présentés par année hydrologique (sept – août) de 2012-2017, et comparés au module interannuel (Banque hydro).

L'année 2016-2017 sans reprise des hautes eau fin janvier se présente encore plus sèche !



III.2. Les dates de prélèvement

Les deux graphes suivants soulignent les conditions particulièrement sèches de cette période d'observation.

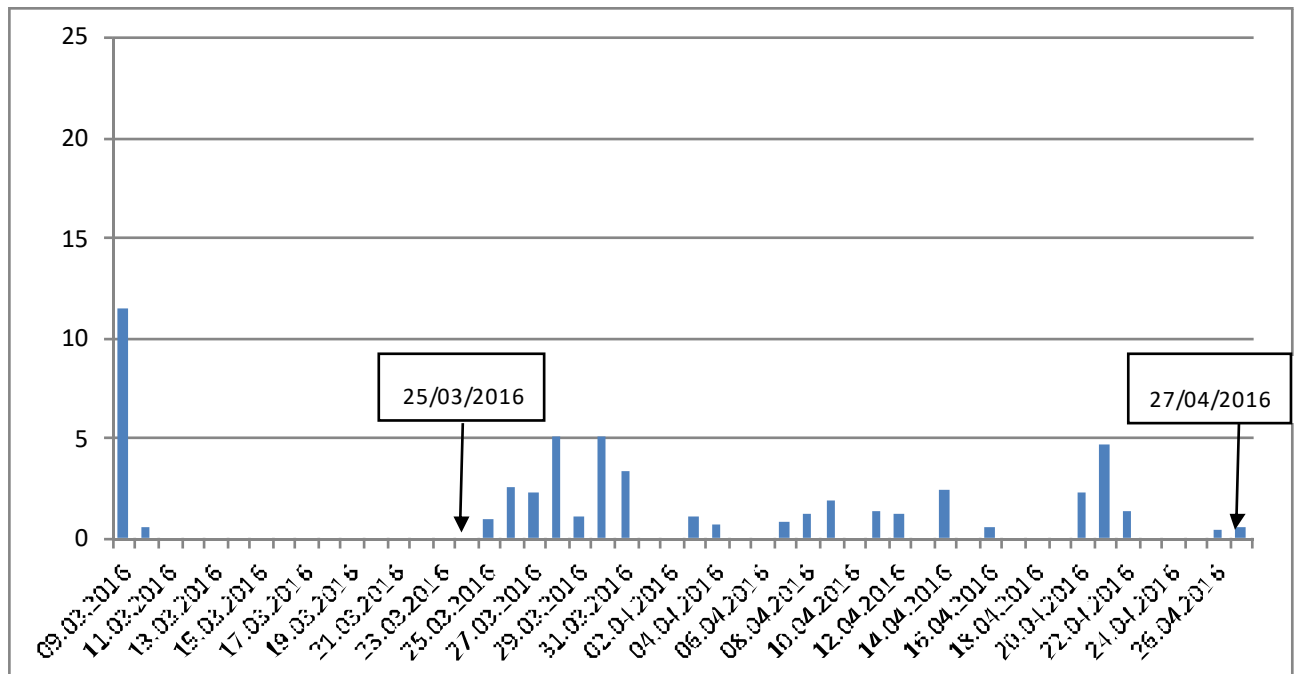
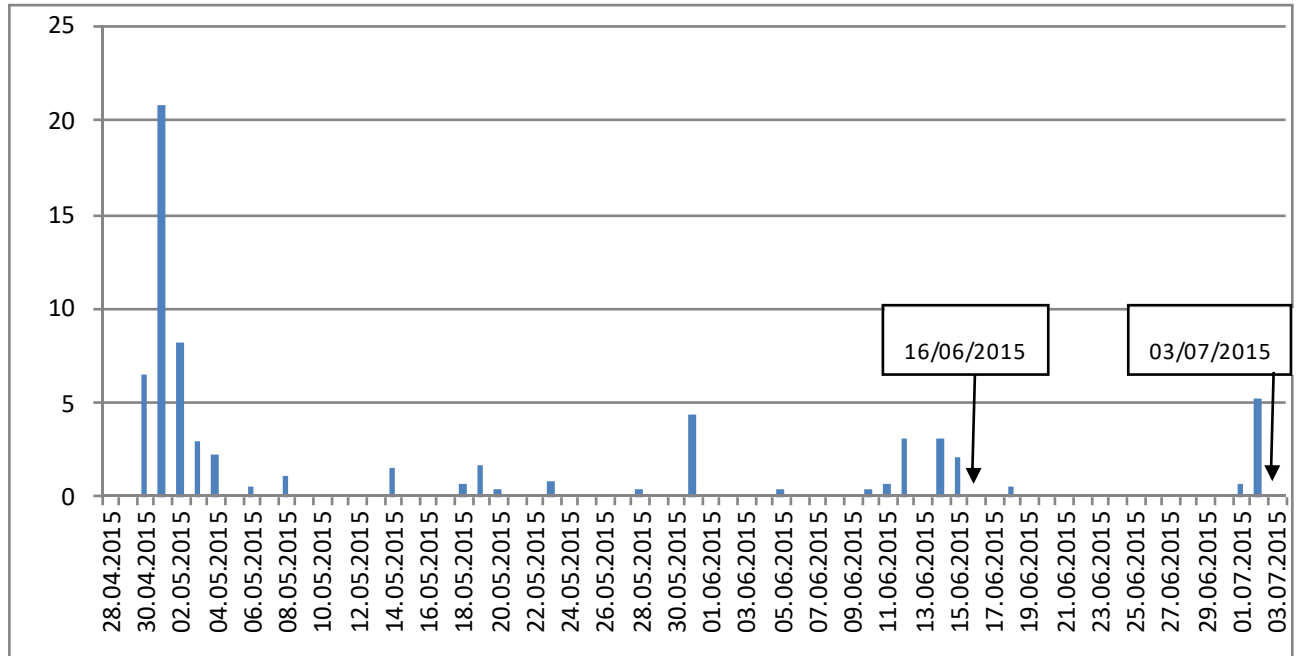


Figure 44 : Conditions pluviométriques lors des périodes d'échantillonnage.

III.3. Les points du suivi

Les 5 points retenus pour le suivi complémentaire sont localisés sur les cours d'eau alimentant le Vioreau :

- **C1** sur le cours d'eau le Pas Chevreuil, en amont du rejet de la station d'épuration de la Meilleraye-de-Bretagne
- **C2** à l'aval de l'étang de Provostière (rigole des Ajots)
- **C3** sur le cours d'eau le Pas Chevreuil, à l'aval du rejet de la STEP
- **C4** sur le rau de l'Isac (recevant le ruisseau de l'Estival)
- **C5** à l'aval du Petit Vioreau

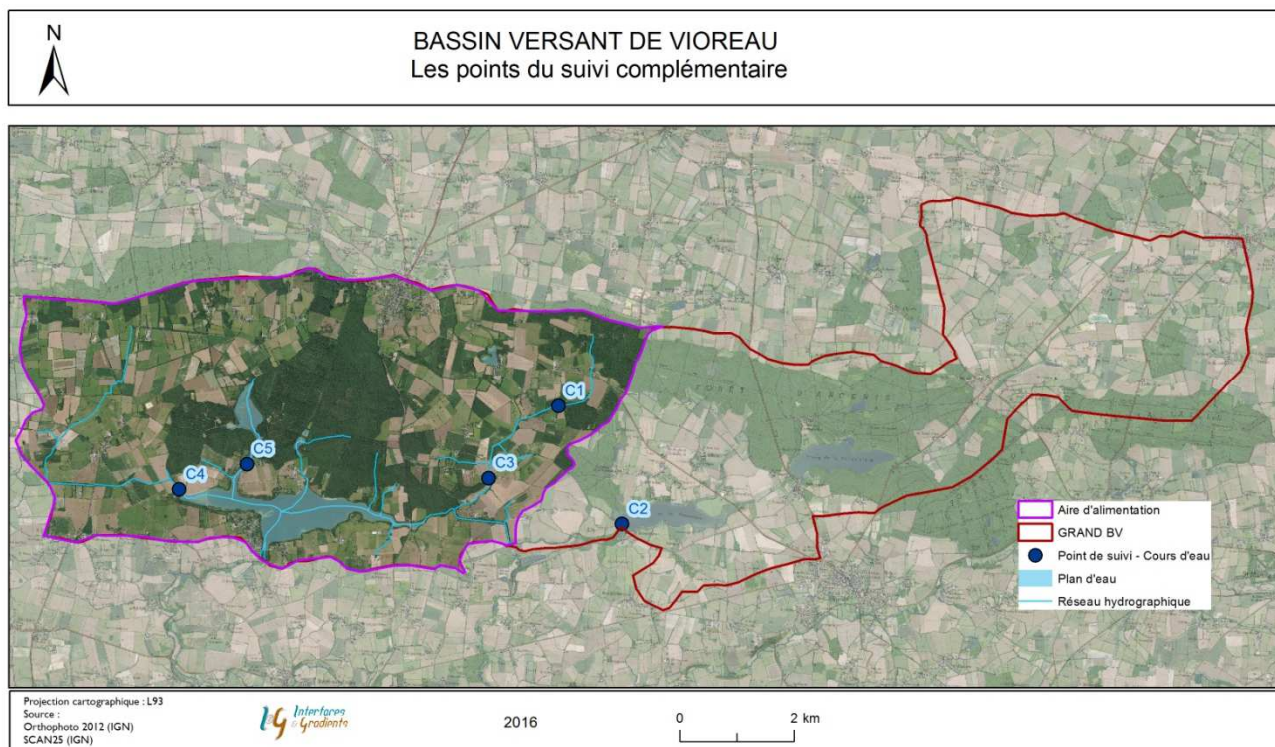
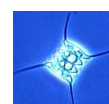


Figure 45: Localisation des points du suivi complémentaire sur le bassin versant de Vioreau

La localisation de ces points a été validée lors du démarrage de l'étude (COTEC 1). Les investigations menées sur le terrain ont conduit à redéfinir les limites actuelles du bassin versant d'alimentation de Vioreau (cf 1.5 Contexte hydrologique / hydraulique). Si aujourd'hui Vioreau n'est plus connecté au bassin versant incluant Provostière et Poitevinière, cette gestion hydraulique n'est pas figée dans le temps.



Le point de suivi V2, à l'aval de Provostière apporte une vision de la qualité de l'eau véhiculée à l'échelle de ce sous-bassin versant Est.

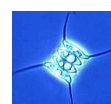
Les paramètres chimiques retenus pour l'analyse des points des prélèvements sont :

- l'ammonium (NH_4)
- le phosphore total (Ptotal)
- les ortho-phosphates (P- PO_4)
- les nitrates (NO_3)
- le carbone organique dissous (COD)

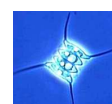
L'appréciation de la qualité chimique des cours d'eau est complétée par l'analyse de deux paramètres bactériologiques, témoins de contamination fécale :

- E.coli (concentration exprimée en UFC/100 ml)
- Streptocoques fécaux (concentration exprimée en UFC/100 ml)

Les résultats des campagnes réalisées en 2015 et 2016 sont présentés à la fin du chapitre suivant.



ETAPE 2: Diagnostic affiné des pressions impactant la qualité de l'eau de Vioreau



I. Les sources d'altérations à l'échelle du bassin versant d'alimentation

I.1. Rappel sur les types de sources de Phosphore

La problématique liée au Phosphore concerne tous les usagers : urbains et ruraux.

Les rejets liés à l'assainissement représentent une source de Phosphore directe, qu'elle soit localisée précisément pour l'assainissement collectif (AC), ou non localisée pour l'assainissement non collectif (ANC).

La prédominance de ces rejets de Phosphore au cours d'eau se traduit par une signature "urbaine" avec une prédominance des ortho-phosphates à l'étiage.

A cette signature "urbaine", vient s'opposer une signature dite "rurale", caractérisée par une prédominance du Phosphore sous sa forme particulaire. Celle-ci est révélatrice de l'érosion des sols et du transfert des particules au réseau hydrographique.

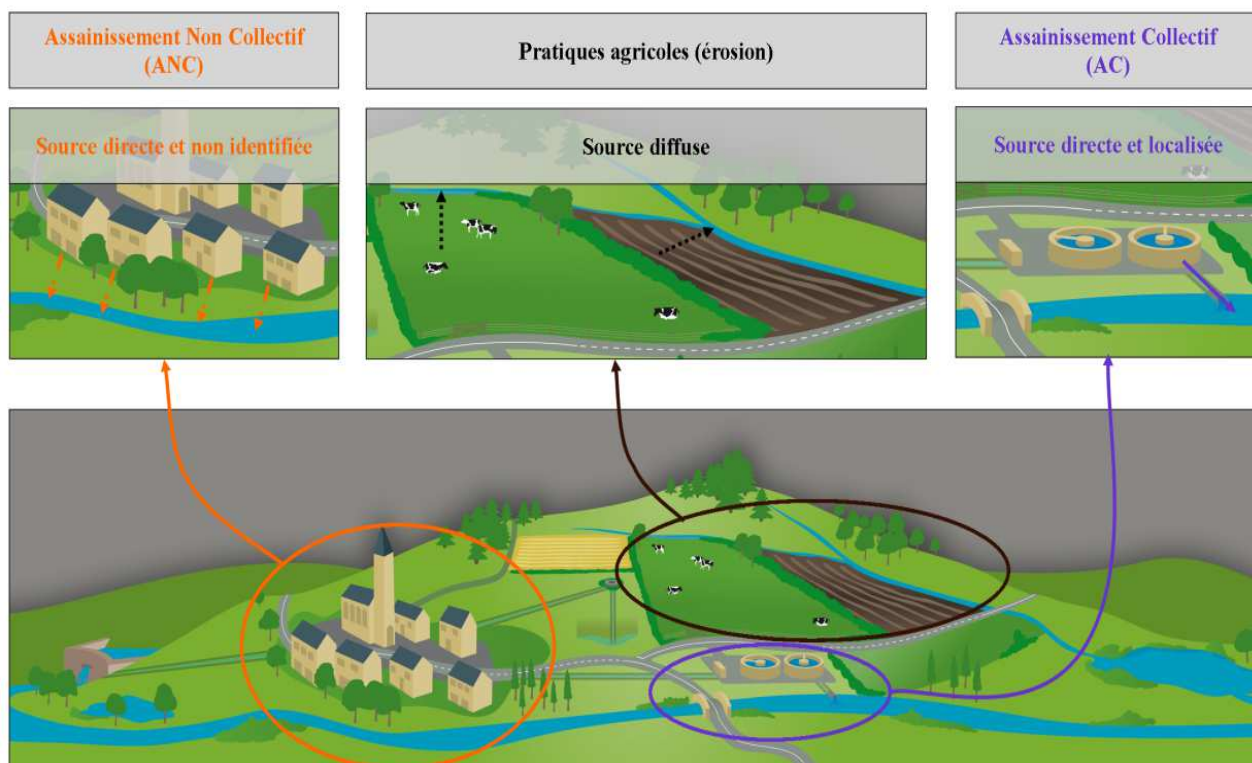


Figure 46 : Les différentes sources de Phosphore à l'échelle d'un bassin versant

Les sources directes de phosphore pourront être traduites en flux de phosphore exportés au cours d'eau. Le flux de phosphore correspond au produit de la concentration en phosphore total par son débit :

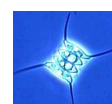
$$\text{Flux de phosphore} \left(\text{en} \frac{T}{\text{an}} \right) = \text{Concentration} * \text{Débit}$$

En fonction du type de données recueillies auprès des exploitants de stations d'épuration, les flux de P seront calculés sur plusieurs années et les variabilités intra-annuelles des débits rejetés seront précisées selon différentes périodes hydrologiques (ex : en basses eaux).

Le poids de l'ensemble des sources directes de phosphore pourra être mis au regard des flux théoriques de P arrivant au lac de Vioreau : la gestion hydraulique du bassin versant de Vioreau complique cependant cette approche des flux. Les débits d'eau arrivant au Vioreau ne peuvent être extrapolés à partir d'une station limnimétrique voisine du BV, qu'avec une forte incertitude.

Concernant la source de phosphore liée à l'érosion, il n'est pas possible d'établir directement un flux.

L'origine diffuse de cette source de P est une réelle difficulté pour réussir à quantifier des flux. Le poids de l'érosion potentielle s'appuie sur un diagnostic de terrain, dont les observations se traduisent en une cartographie du risque potentiel d'érosion et de transfert de sols à l'échelle des parcelles.



I.2. La source liée à l'assainissement collectif

I.2.1. Impact de la station d'épuration du bourg de la Meilleraye-de-Bretagne

La commune de la Meilleraye-de-Bretagne localisée au Nord du bassin versant de Vioreau est équipée d'une station d'épuration (STEP) de type boues activées. Mise en service en 2010 en remplacement du système de lagunage naturel, elle traite les eaux domestiques du bourg avant de les rejeter dans le milieu récepteur : un petit affluent du ruisseau "Le Pas Chevreuil" (Figure 47).

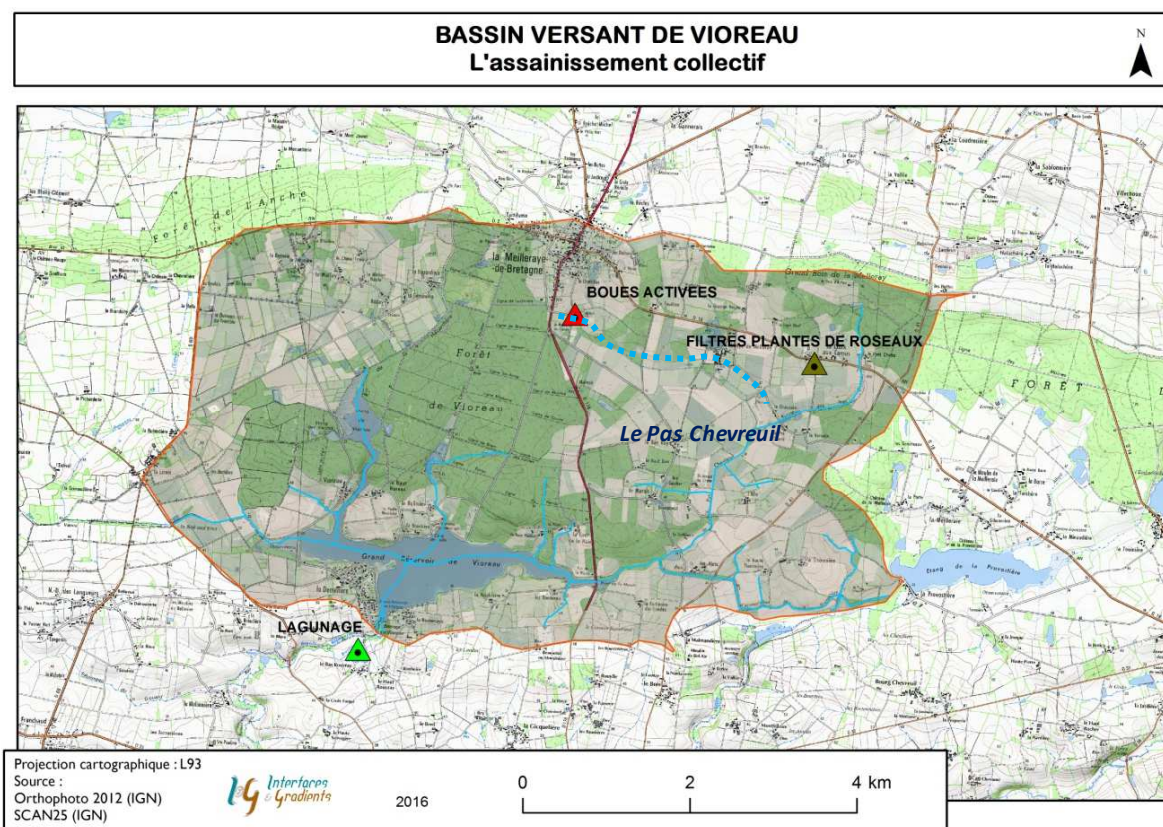


Figure 47 : Localisation des stations d'épuration du bassin versant de Vioreau

Cette STEP, dimensionnée pour 1900 équivalents habitants (EH) démontre par ses résultats de suivi de la qualité du rejet, un bon abattement du Phosphore. Les résultats hebdomadaires des auto-contrôles du rejet indiquent une concentration en orthophosphates de l'ordre de 1 mg de P-PO₄/l : ce qui représente un bon rendement épuratoire pour ce paramètre (Tableau 3).

Rejet STEP	2013	2014	2015
[P-PO ₄] en mg/l	0,89	0,80	1,02

Tableau 3 : Moyenne annuelle de la concentration en ortho-phosphates du rejet de la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne d'après les résultats des autocontrôles hebdomadaires

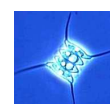
Les débits de la STEP rejetés au cours d'eau sont mesurés quotidiennement. La moyenne annuelle des débits rejetés sur les 3 dernières années montre un écart de 20 % entre l'année 2013 et l'année 2015 (Tableau 4). Cette variation interannuelle s'explique par les conditions hydrologiques variables d'une année à l'autre. L'ensemble des stations d'épuration est en effet soumis aux intrusions d'eau dites parasites en période de hautes eaux (période hivernale) ou de forts débits (ex : orages estivaux).

STEP Meilleraye-de-Bretagne	2013	2014	2015
moyenne débit journalier (m ³ /jr)	308	276	255

Tableau 4 : Moyenne annuelle des débits rejetés par la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne d'après l'examen des suivis journaliers

Les variations intra-annuelles des débits illustrent l'influence de ces eaux parasites, qui font augmenter les quantités d'eau arrivant en entrée de station, et donc intrinsèquement les débits en sortie. L'hiver 2013-2014 a été particulièrement pluvieux, impliquant des pics hydrauliques en entrée de station. La capacité hydraulique de la station, fixée à 360 m³/jour est ponctuellement dépassée lors des périodes de plus forte pluviométrie (Figure 48).

D'une façon générale, ces eaux claires peuvent perturber le bon fonctionnement des stations, qui sont des outils relativement sensibles aux coups hydrauliques.



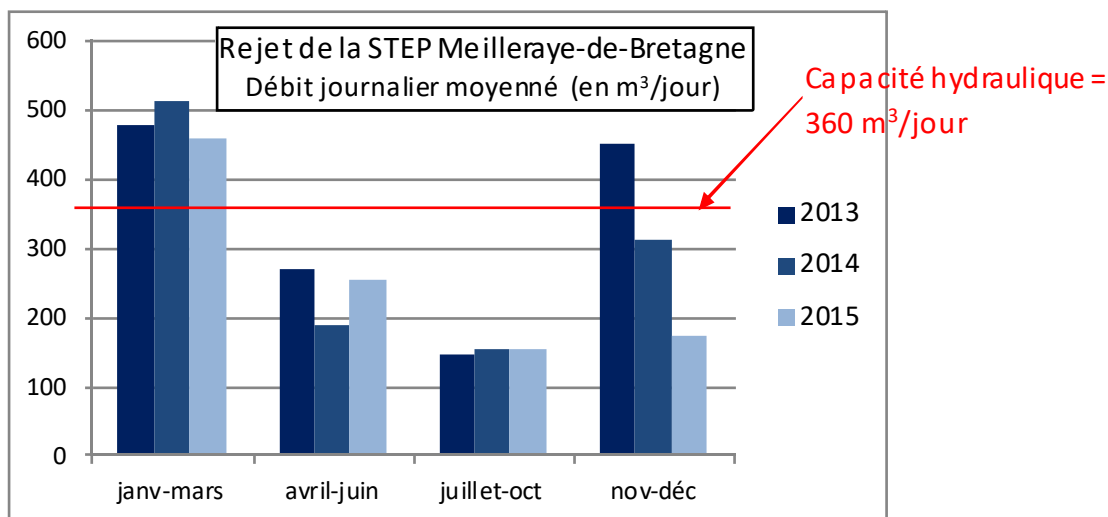


Figure 48 : Variations des débits journaliers rejetés en fonction de différentes périodes de l'année, pour la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne

Le flux annuel de phosphore rejeté par la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne est estimé à partir des données de suivi du rejet (débits, concentrations en phosphore). Ce flux annuel de phosphore rejeté au cours d'eau s'élève à 0,1 T de P-PO₄/an.

Le poids lié à cette pression apparaît modéré à faible au regard du flux "théorique" de P véhiculé dans le bassin versant de Vioreau : estimé entre 0,7 et 2 T de P.

1.2.2. Le hameau de la Croix aux Camus

Les efforts de la Meilleraye-de-Bretagne en terme d'assainissement collectif se sont également portés sur la mise en place d'un petit système d'épuration extensif (un filtre planté de roseaux) pour le hameau "la Croix Camus" dans la partie Nord-Est du bassin versant (Figure 47).

Cette petite station d'épuration, de l'ordre de la dizaine d'équivalents habitants implique une atténuation du rejet dans le milieu naturel. Le suivi complémentaire de l'étude diagnostic de Vioreau comprend un point de prélèvement (station n°1) en aval de la STEP : les résultats détaillés dans le chapitre V démontrent que la signature chimique du cours d'eau récepteur n'est pas influencé par des rejets potentiels (ammonium, phosphore).

I.2.3. Les lagunes naturelles de Joué-sur-Erdre

Les habitats denses au Sud de Vioreau, en rive droite (la Demenure) et en rive gauche (la Romeraye) envoient leurs eaux usées vers le système de lagunage naturel (540 EH) de la commune de Joué-sur-Erdre, situé à l'aval du barrage (Figure 49).

La base nautique de Vioreau exporte aussi ses eaux usées vers le lagunage naturel, via une canalisation souterraine qui traverse le lac.

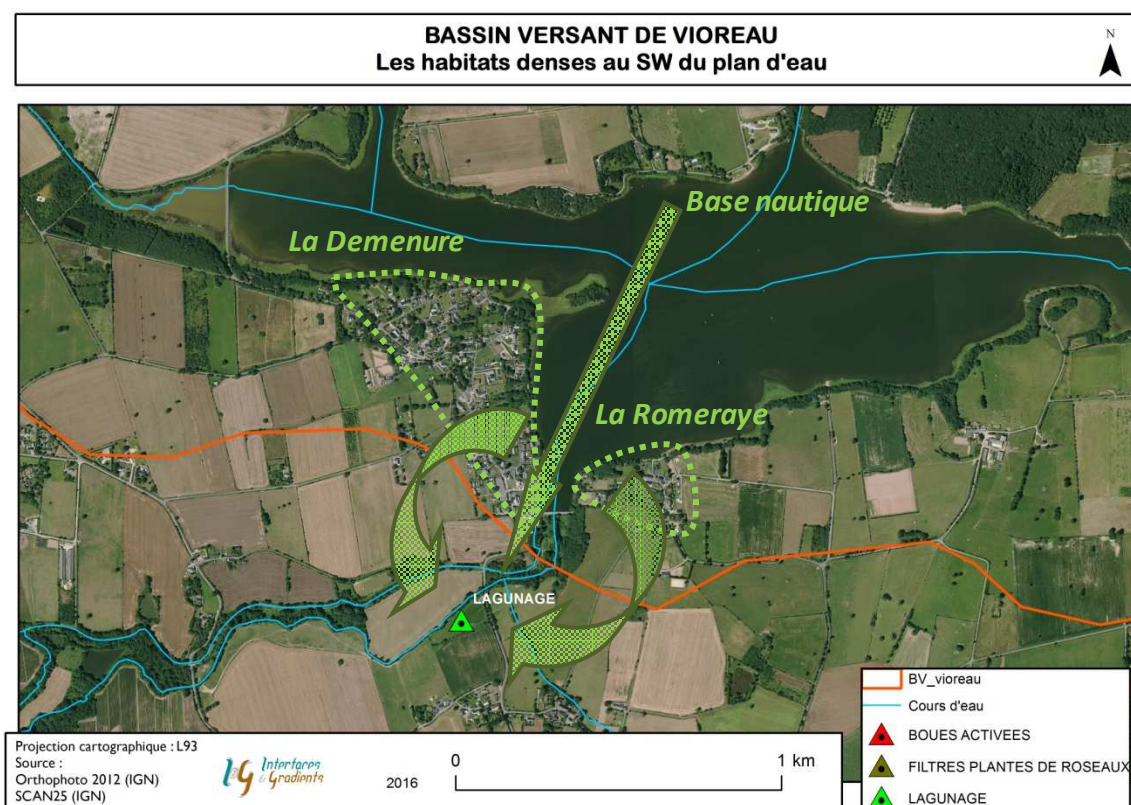
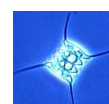


Figure 49 : Les habitats denses aux abords immédiats du Vioreau envoient leurs eaux usées vers les lagunes (hors BV) de Joué-sur-Erdre

Le rejet des lagunes (lagunage naturel) est en dehors du bassin versant de Vioreau : les eaux traitées rejoignent le cours d'eau du Baillou, affluent de l'Erdre. La qualité du rejet traité ne peut donc pas impacter les eaux du Grand Vioreau.



I.3. La source liée à l'assainissement non collectif

Le Service Public d'Assainissement Non Collectif (SPANC) assure un contrôle des installations, aussi bien lors de constructions que de réhabilitations. La vérification porte sur la conformité du dispositif (norme DTU-64-1), mais aussi sur son entretien et son bon fonctionnement.

Les diagnostics de conformité des installations autonomes (ANC) fournis par la COMPA ne permettent cependant pas d'évaluer la pression que représente ce type d'assainissement en terme de source de phosphore pour le réseau hydrographique.

L'ANC représente une source de phosphore directe, mais difficile à localiser. Nous avons mis au point un protocole spécifique à cette problématique, en choisissant de hiérarchiser les habitations par leur poids statistique selon leur connexion au réseau hydrographique et/ou au réseau de fossés connectés.

Sur les versants immédiats du bassin versant de Vioreau : 40 installations d'assainissement non collectif ont été localisées à partir des données recueillies auprès de la COMPA. Ces ANC ont ensuite été hiérarchisés selon leur distance au cours d'eau. Ce calcul de hiérarchisation est réalisé directement sous SIG par le biais d'une jointure.

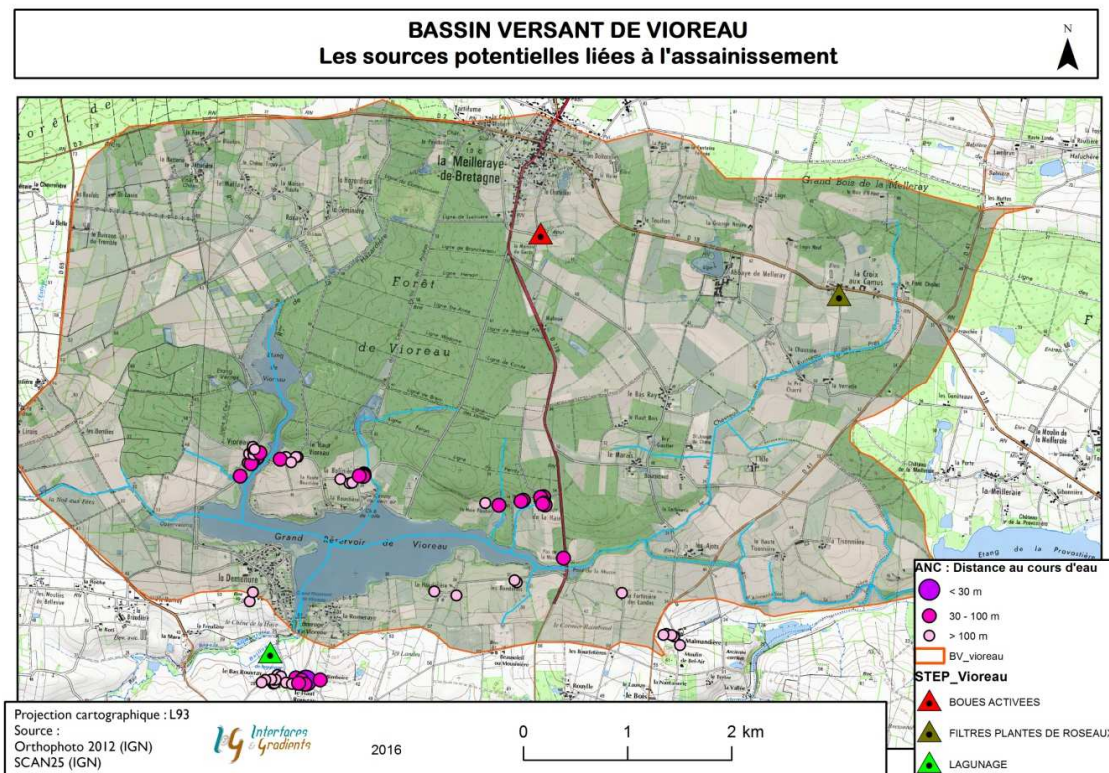


Figure 50 : Localisation et hiérarchisation des ANC par rapport au réseau hydrographique

La cartographie obtenue (Figure 50) est une carte de risque potentiel qui s'appuie sur le postulat suivant : plus la fosse est proche du cours d'eau, plus elle représente un risque élevé en terme de source de phosphore. A l'inverse, plus la fosse est éloignée du réseau hydrographique, plus le taux d'abattement du phosphore par le compartiment sol sera effectif, attribuant à la fosse un risque faible (Figure 51).

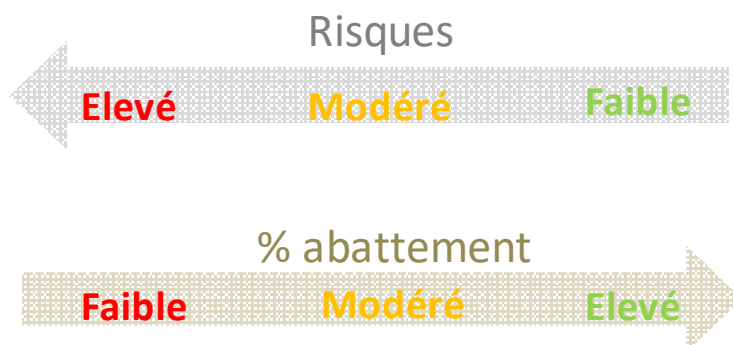


Figure 51 : Equivalence entre le degré de risque de transfert de Phosphore au cours d'eau (ou fossé circulant) et le pourcentage d'abattement selon notre méthodologie

Les classes de risques basées sur la distance au cours d'eau et les taux d'abattement sont discutables et perfectibles : l'objectif est de traduire l'information spatiale en une donnée quantitative, en considérant la source liée à l'ANC comme étant non uniforme, ce qui nous apparaît plus réaliste à l'échelle du bassin versant.

Ce sont les secteurs au Nord du Grand Vioreau, appartenant à la commune de Joué-sur-Erdre, qui comprennent la majorité des ANC (Figure 52). Selon les résultats de notre classification, les ANC se caractérisent soit par un risque modéré ou un risque faible. Aucune fosse n'est à moins de 30 m du cours d'eau le plus proche.

Rappelons que l'existence d'un réseau potentiel de fossés circulants, c'est-à-dire connectés au cours d'eau, pourrait venir "raccourcir" ces distances et modifier l'attribution des classes de risques. Par exemple, une fosse caractérisée par un risque modéré pourrait passer au risque élevé si un fossé circulant était identifié à proximité de l'habitation.

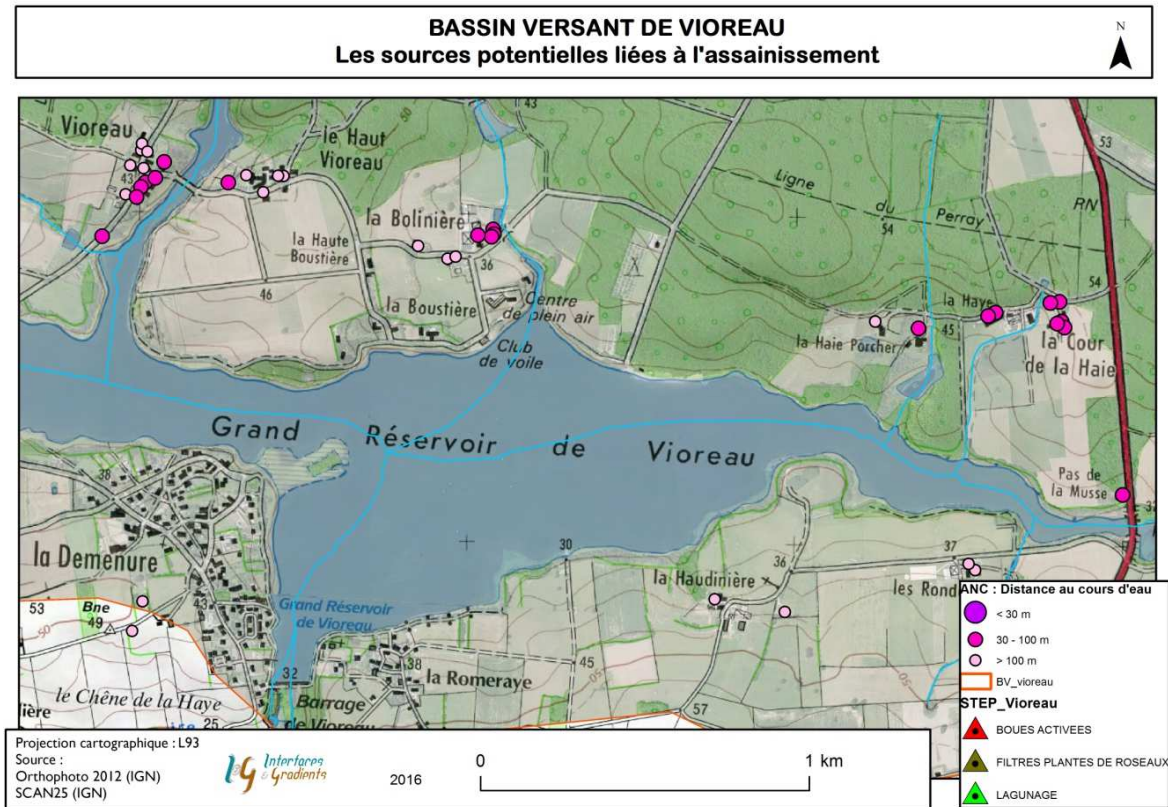


Figure 52 : La majorité des ANC est localisée sur le versant Nord du Grand Vioreau

Un calcul de flux de Phosphore lié à l'ANC est ensuite tenté à partir de la hiérarchisation obtenue (Figure 52). Deux hypothèses de travail sont nécessaires à l'établissement de ce calcul de flux :

- 2,4 personnes/ANC (Insee 2013 pour la commune de Joué-sur-Erdre)
- 2,1 g de P/EH₆₀ produit par jour (* Cemagref 2009)

* Dans son document de synthèse bibliographique sur l'état des eaux usées (2009), le Cemagref a rapporté des données de charges spécifiques moyennes calculées à partir des données d'auto-surveillance de l'année 2007 pour 247 stations.

Le flux de Phosphore potentiellement rejeté par les ANC de Vioreau s'établit à 0,01 T de P/an (Tableau 5) selon les hypothèses de travail précitées.

total ANC	ANC < à 30 m ANC risque élevé	ANC: 30 à 100 m ANC risque moyen	ANC > 100 m ANC risque faible
40	0	20	20
	flux entrée (en T de P/an) 0,000	flux entrée (en T de P/an) 0,038	flux entrée (en T de P/an) 0,038
	abatt 30%	abatt 70%	abatt 95%
	flux sortant (en T de P/an) 0,000	0,011	0,002
Flux total sortant (en T de P/an)	0,013		

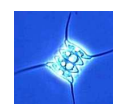
Tableau 5 : Flux de Phosphore lié à l'ANC obtenu d'après notre méthodologie de classification

Nous rappelons que le flux (réel) de Phosphore rejeté par la STEP de la Meilleraye-de-Bretagne s'élève à 0,1 T de P/an : ce qui est déjà faible au regard des flux théorique de P véhiculés dans le réseau hydrographique du bassin versant.

Le poids de l'ANC (40 installations) à l'échelle de Vioreau, se caractérise par une pression faible, en terme de source de phosphore.

I.4. Synthèse sur les rejets liés à l'assainissement collectif et non-collectif à l'échelle du bassin versant de Vioreau

- Le parc d'assainissement est réduit et localisé sur la commune de la Meilleraye-de-Bretagne : une boue activée (1900 EH) et un filtre planté de roseaux (10 EH).
- Concernant l'amélioration du traitement épuratoire : les efforts ont déjà été entrepris par la commune en faisant évoluer son ancien système de lagunage naturel en une boue activée.
- Les résultats du suivi de performance épuratoire concluent à un bon fonctionnement de la STEP, notamment pour le paramètre phosphore.
- Le flux de Phosphore rejeté est faible au regard du flux théorique véhiculé dans les cours d'eau du BV : 100 kg de P-PO₄/an rejeté par la STEP contre 1000 à 5000 kg de P/an.
- Les habitats denses des hameaux au Sud du Grand Vioreau envoient leurs eaux usées vers les lagunes naturelles situées hors BV à l'aval du barrage. Dans l'hypothèse de réseaux EU en bon état (étanchéité) : ces secteurs n'influencent pas la qualité de l'eau de Vioreau.
- L'impact potentiel des installations d'assainissement autonomes dispersées sur les versants immédiats du lac a été évalué grâce à des hypothèses de travail et à une méthodologie "maison" basée sur le risque de transfert de phosphore et non sur la qualité de l'outil d'épuration.
- Le flux de Phosphore lié à l'ANCs est révélé être très faible, malgré une vision "pessimiste" des ANC, qui considère que tous les ANC ont un rejet potentiel.



I.5. La pression liée à l'érosion

I.5.1. L'approche terrain développée

Notre diagnostic terrain repose sur le repérage des éléments marquants dans l'organisation du paysage, qui contrôlent les modalités de transferts de sols entre les zones d'érosion (les parcelles agricoles) et le réseau hydrographique.

Les transferts d'eau et de sols à l'échelle du bassin versant sont en partie conditionnés par les structures paysagères telles que les réseaux de fossés, qui s'apparentent à de véritables drains artificiels, susceptibles de connecter une parcelle parfois très éloignée au cours d'eau.

Ces fossés circulants s'avèrent être parfois d'incontestables courts-circuits aux bandes enherbées desservant leur rôle de protection des cours d'eau (Photo 9). La dégradation (ou l'absence totale) des protections en bordure de fossé (flèche marron) amplifie le transfert des produits d'érosion au cours d'eau (flèche orange).

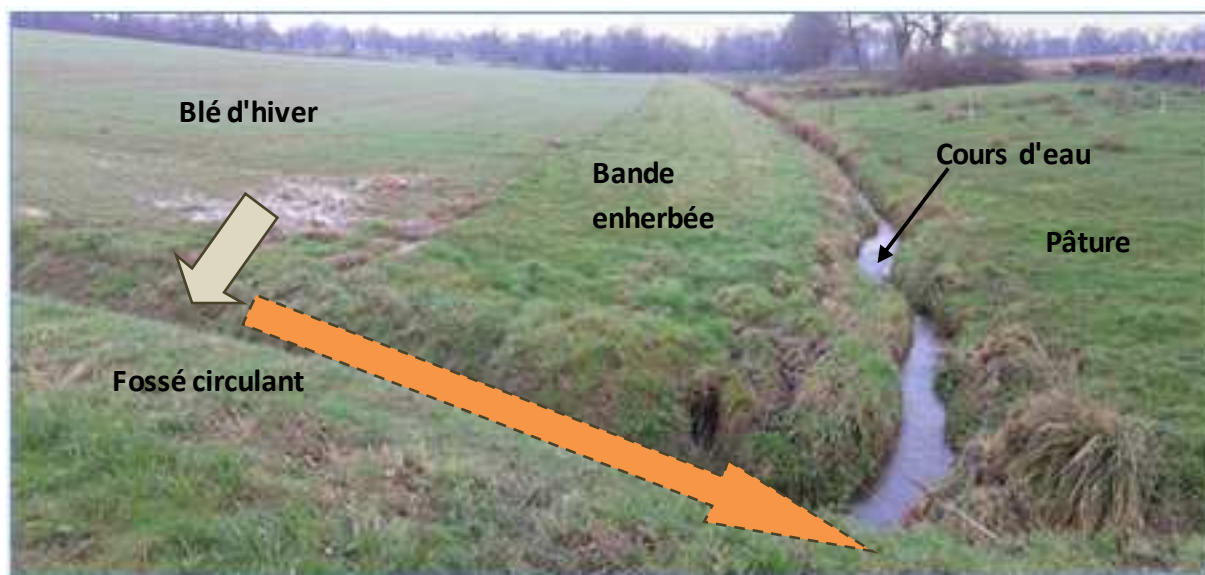


Photo 9 : Dans certaines configurations, le rôle de protection des bandes enherbées peut être court-circuité par l'absence de barrière physique entre la parcelle et le fossé ([photo hors étude](#)).

Sur le terrain, ce sont donc les trois composantes du paysage Parcelle, Talus (ou merlon) et Fossés (ou route) qui sont analysées et hiérarchisées selon un degré de risque potentiel d'érosion, et ce à l'échelle du bassin versant d'alimentation de Vioreau.

Une absence de talus (ou de merlon) coïncidant avec une forte pente correspond ainsi, d'après notre classification à un risque potentiel élevé de transfert des produits d'érosion au fossé et au cours d'eau (Photo 10). A l'inverse, la présence d'une barrière physique de type talus ou merlon limite, voire supprime ce risque de transfert au fossé circulant.



Photo 10 : Repérage des parcelles à risque d'érosion et de transfert potentiel de sols sur le bassin versant d'alimentation de Vioreau

1.5.2. Résultats : carte des bordures de parcelles à risque de transfert

Rappelons que la moitié du BV d'alimentation réel correspondent à des zones boisées, réduisant la superficie des terres agricoles à 48 % du BV. D'après les données existantes, la densité bocagère est relativement élevée sur cette SAU : 70 ml/ha (Figure 53).

Cette cartographie de la densité bocagère ne décèle cependant pas les éventuelles discontinuités (ex : trou dans le talus bocager) qui ont pu être observées sur le terrain (Photo 11). A l'inverse, les zones agricoles peu denses en éléments bocagers ne se traduisent pas forcément par un risque d'érosion plus élevé : c'est l'aménagement d'un talus ou d'un merlon en bas de parcelle qui conditionne le risque d'érosion, qu'il soit ou non pourvu d'éléments bocagers.

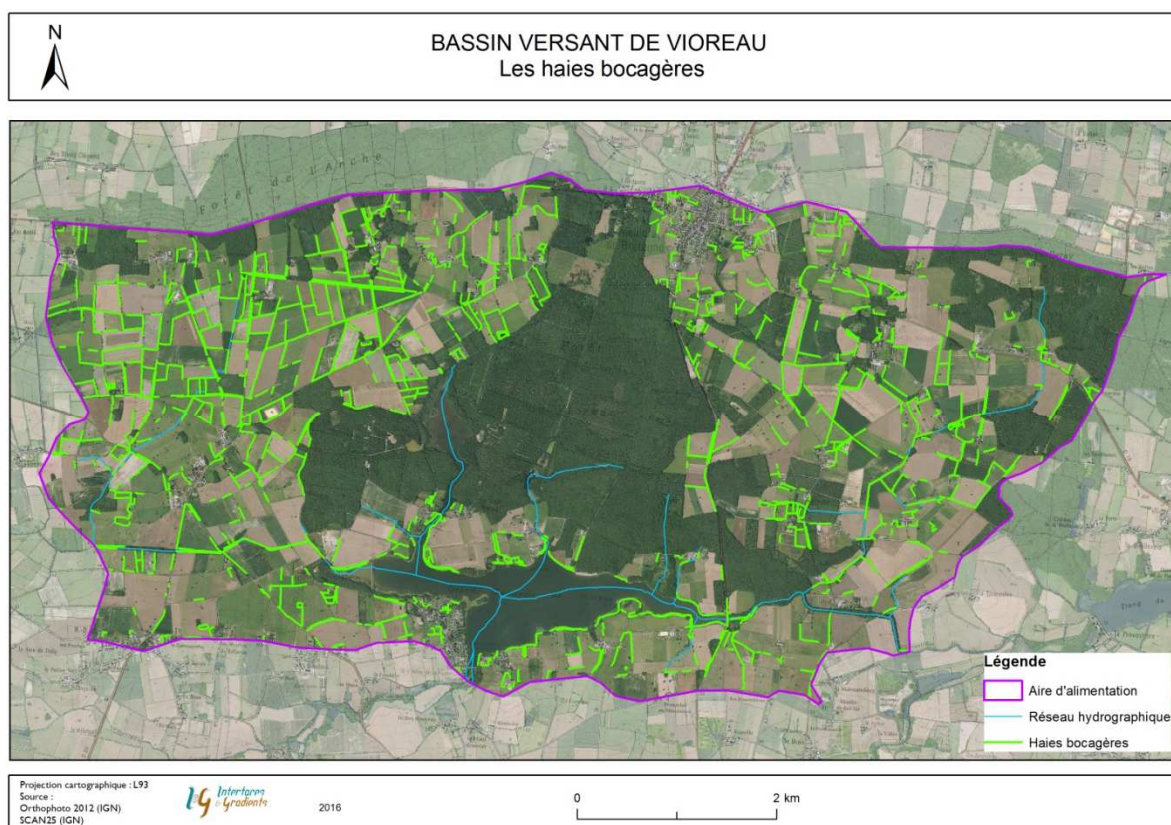


Figure 53 : Cartographie de la densité bocagère sur la partie agricole du BV d'alimentation de Vioreau

A l'échelle du grand bassin versant de Vioreau (77,6 km²), ce sont 303 km de linéaires en bordure de parcelle/fossé qui ont été parcourus et hiérarchisés : du risque faible d'érosion (présence d'un talus ou d'un merlon) au risque élevé d'érosion (absence ou dégradation de la barrière physique). Ces éléments sont géo-référencés dans une base de données sous SIG (Figure 54).



Photo 11 : Haie bocagère en cours d'arasement sur le bassin versant de Vioreau (2016)

A l'échelle du bassin versant d'alimentation de Vioreau (44,2 km²), le linéaire des bordures de parcelles à risque élevé d'érosion s'élève à 8 km, soit à peine 3 % du linéaire total cartographié. Le poids du risque potentiel d'érosion apparaît ainsi limité à cette échelle.

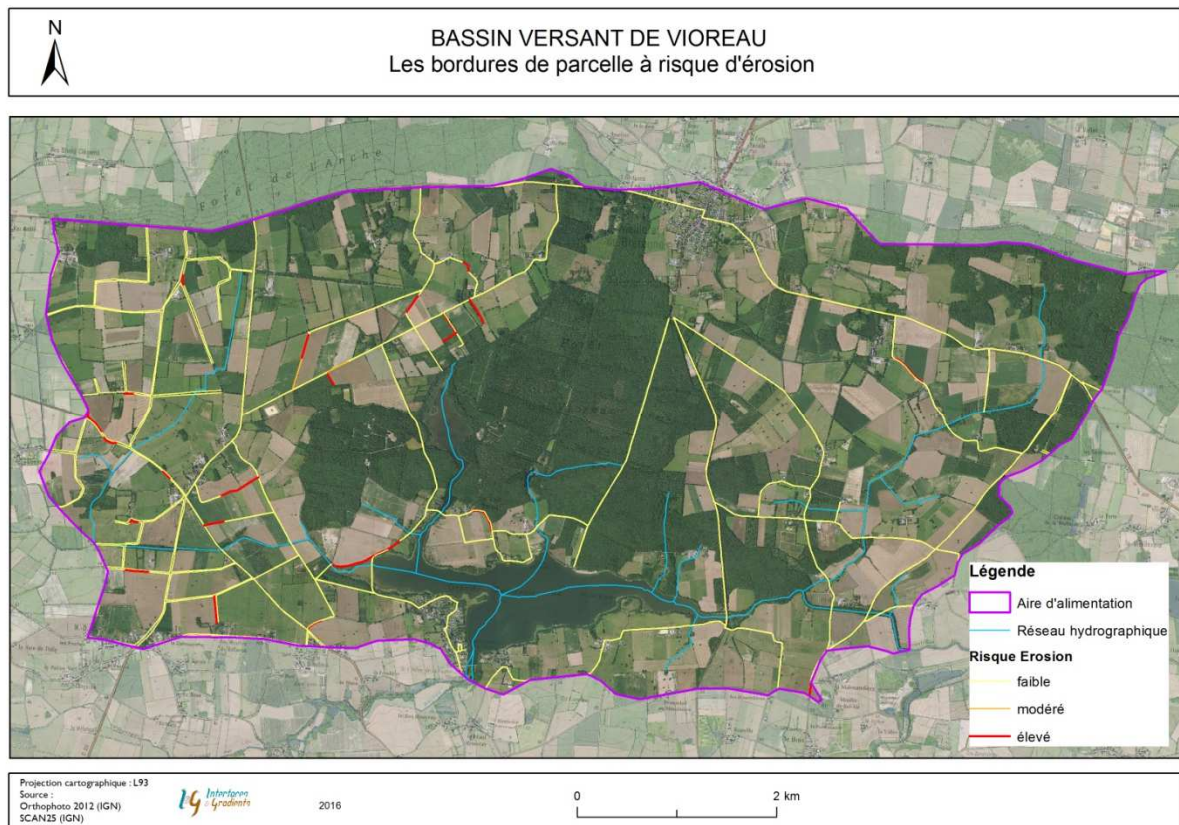
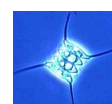


Figure 54 : Cartographie du risque d'érosion des bordures de parcelles sur le bassin versant de Vioreau

C'est la partie Ouest du BV de Vioreau qui présente la plus forte densité de bordures de parcelle à risque élevé d'érosion (Figure 54), en dépit d'une densité élevée en éléments bocagers (Figure 53), surtout pour le secteur Nord-Ouest.

Dans notre approche terrain, c'est bien l'organisation du maillage bocager qui prévaut sur la densité et qui va limiter ou aggraver le risque de transfert potentiel de sols au fossé puis au réseau hydrographique.

Pour ces parcelles pré-identifiées, le risque avéré d'érosion pourra être confirmé par des observations sur le terrain en période hivernale sous des épisodes de pluies significatives ; ce que les deux derniers hivers (2015-2016 et 2016-2017) n'ont pas rendu possible !



I.5.3. Les parcelles directement connectées au cours d'eau

Notre approche terrain se focalise sur les parcelles indirectement connectées aux cours d'eau, via les fossés de route. Ce sont les parcelles cultivées et situées sur les versants en amont qui représentent potentiellement des surfaces contributrices en terme d'érosion.

Néanmoins, la faible densité du réseau hydrographique de Vioreau conjuguée à un important réseau de routes et chemins implique que la quasi-totalité des parcelles ait été caractérisée, y compris les parcelles directement connectées au cours d'eau.

Ces dernières sont traversées par des petits cours d'eau, d'ordre 1 (tête de bassin versant) ou 2 (confluence de deux tronçons d'ordre 1). Généralement non localisés sur l'IGN (échelle 1/25 000) de par leur caractère intermittent ou du fait de leur faible débit, ils ne sont pas protégés par une bande enherbée (Photo 12).

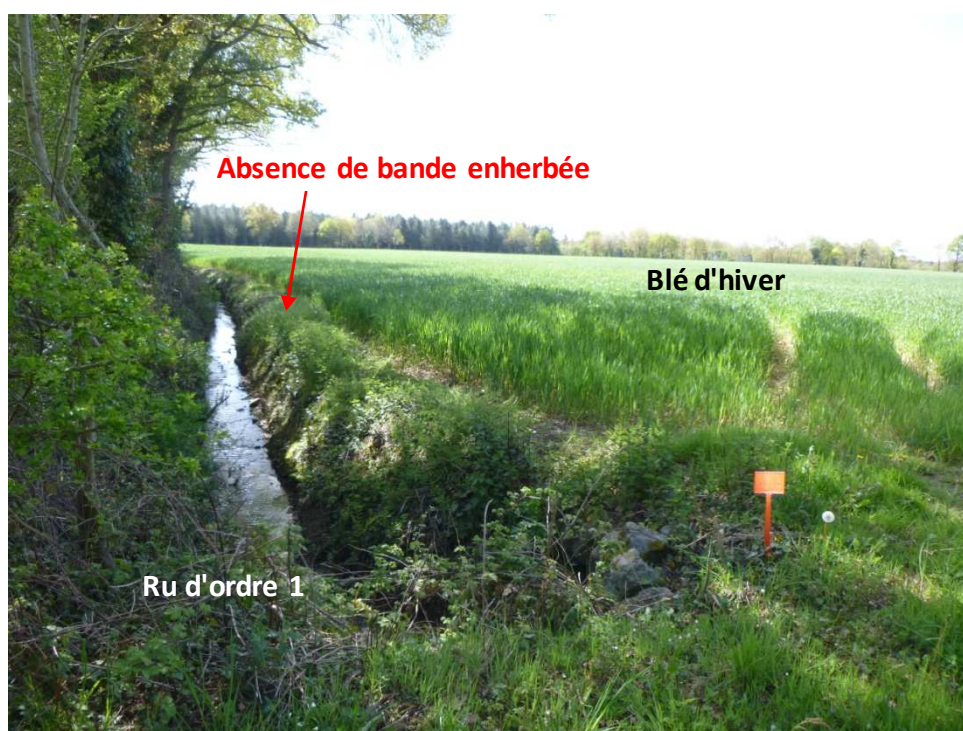


Photo 12 : Les cours d'eau d'ordre 1 non référencés sur l'IGN ne présentent pas de caractère obligatoire pour les bandes enherbées (ici le ruisseau de la Jahotière d'ordre 1 au NW de Vioreau)

Pour les cours d'eau localisés sur IGN, la mise en place d'une bande enherbée revêt un caractère obligatoire.

Nb : La réglementation en lien avec la gestion adaptée des bordures de cours d'eau découle de l'arrêté relatif au 4^{ème} programme d'action à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole, applicable à tout le département de Loire-Atlantique.

" Tous les cours d'eau figurant en trait plein et pointillé sur la carte IGN au 1/25 000 la plus récente doivent faire l'objet soit de l'implantation d'une bande enherbée, soit d'une bande boisée, d'une largeur de 5 mètres minimum. Les bandes enherbées ou boisées existantes doivent être conservées. Les prairies permanentes se trouvant le long des cours d'eau doivent être maintenues sur une largeur d'au moins 35 mètres. "

A l'échelle du bassin versant de Vioreau, les deux principaux cours d'eau à caractère rural correspondent à celui du Pas Chevreuil (Figure 55) sur le secteur Est et celui de l'Estival en partie Ouest : les autres affluents étant quasi-exclusivement en domaine forestier.

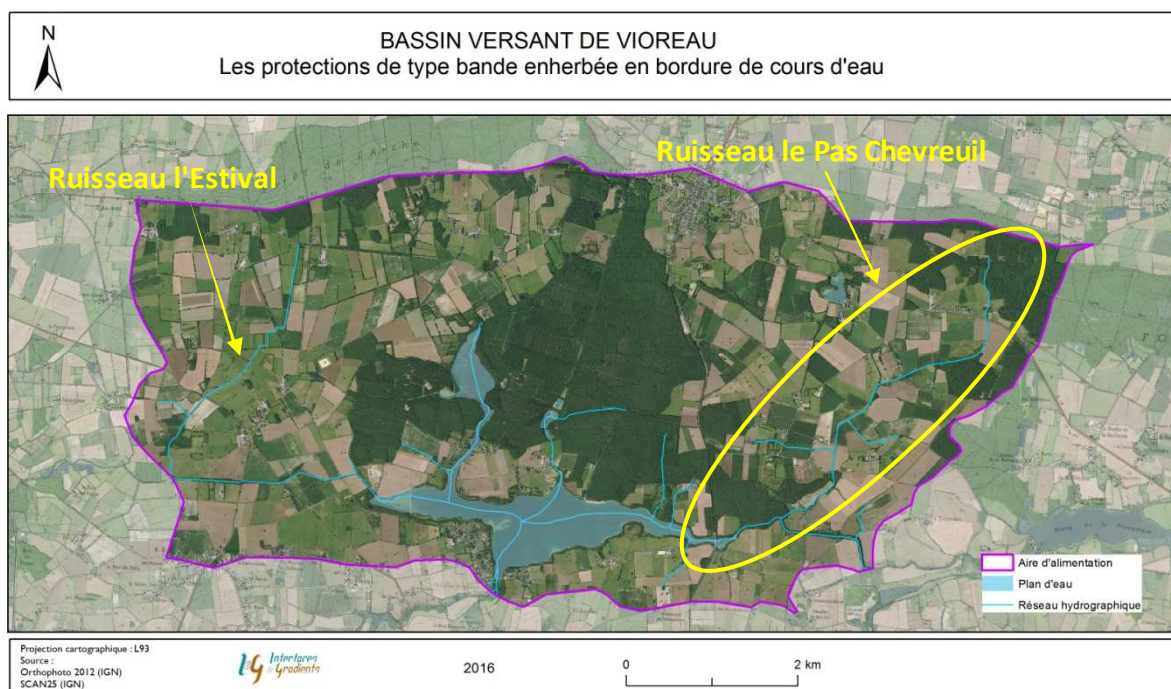


Figure 55 : L'un des principaux cours d'eau du BV à caractère rural, le ruisseau du Pas Chevreuil

Une bande enherbée continue est implantée sur les bords du ruisseau le Pas Chevreuil (Figure 56), le protégeant du ruissellement en provenance des parcelles cultivées.

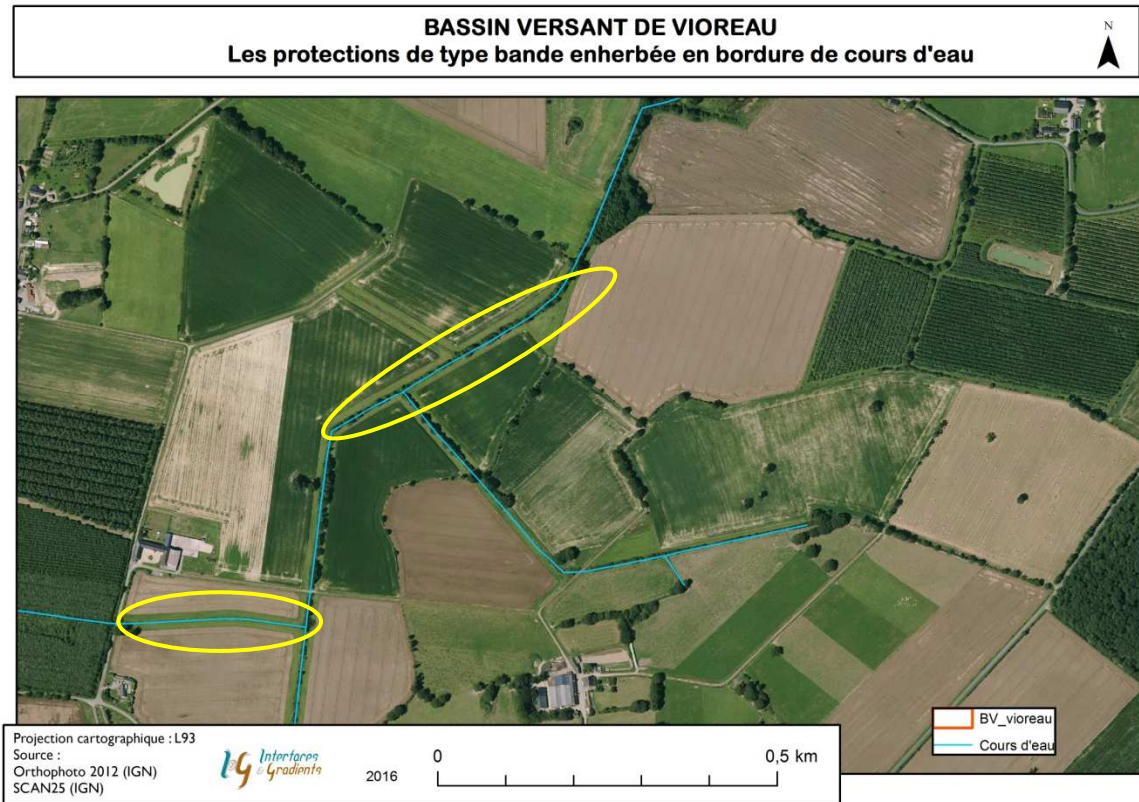


Figure 56 : Le ruisseau le Pas Chevreuil est protégé des parcelles cultivées par une bande enherbée continue le long de ses deux rives

La bande enherbée agit comme une zone tampon : les écoulements de surface en provenance de la surface cultivée sont ralentis : ce qui favorise la décantation des particules de terre et donc de Phosphore particulaire associé.

Les flux d'eau et de matières transmis au réseau hydrographique sont alors atténués.

1.5.4. Les facteurs aggravants

Le positionnement des entrées de champ joue le rôle de lien hydrologique entre la parcelle et le réseau de fossé. Elles augmentent considérablement le niveau de connectivité hydrologique au sein du bassin versant. Le rôle de protection d'un linéaire de haie (ou un talus) peut être fortement amoindri lorsque l'entrée de champ est positionnée en bas de parcelle agricole (Photo 13), jouant ainsi le rôle de collecteur du ruissellement.



Photo 13 : Certaines entrées de champ positionnées en bas de parcelle aggravent le risque d'érosion en jouant le rôle de collecteur du ruissellement.

D'autres facteurs aggravants ont été identifiés lors des phases terrain comme les parcelles piétinées, les drains agricoles et les trous dans les talus. Ces risques ponctuels viennent amplifier le risque d'érosion en accélérant (ou facilitant) le transfert des produits d'érosion au réseau de fossés circulants.

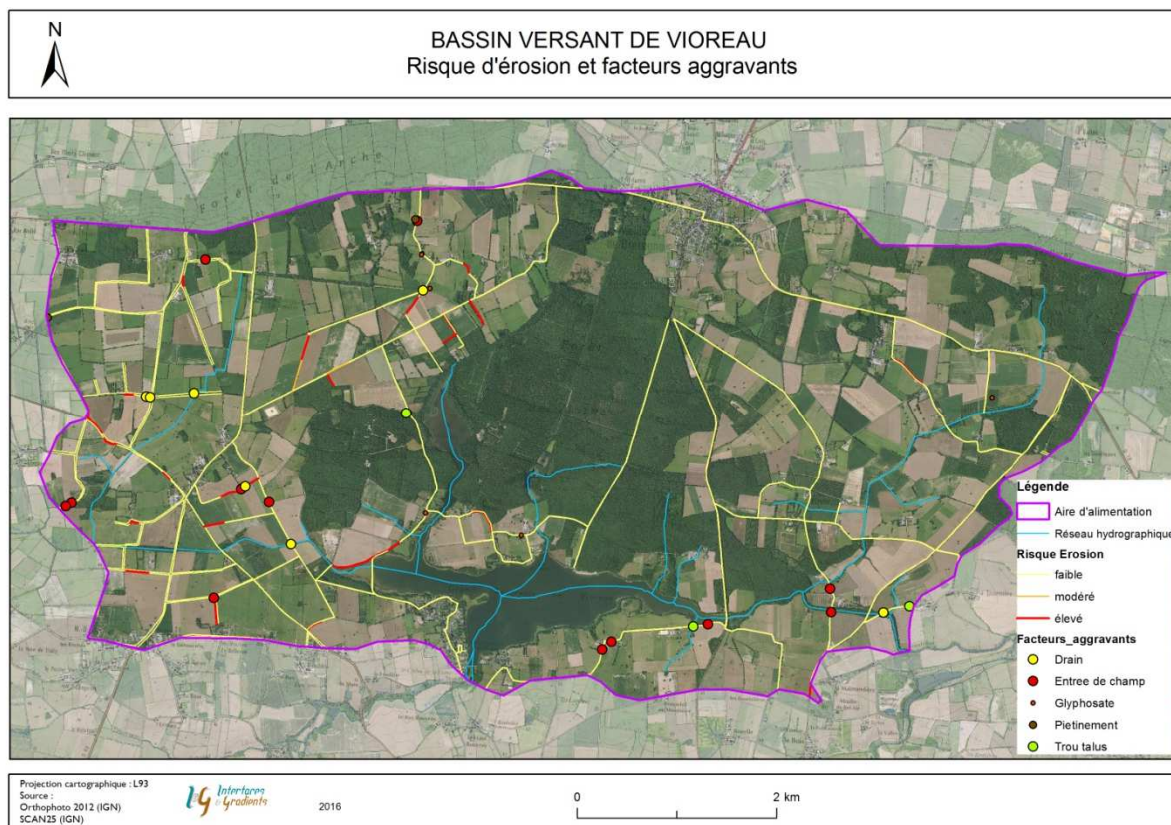


Figure 57 : Cartographie des facteurs aggravants du risque d'érosion sur le bassin versant de Vioreau

Les risques ponctuels reportés sous SIG sont peu nombreux à l'échelle du bassin versant de Vioreau (Figure 57). Au final, les résultats du diagnostic terrain traduisent un risque potentiel d'érosion limité et peu aggravé par la présence de risques ponctuels comme les entrées de champ.

Les conditions de réalisation du diagnostic n'ont pas permis d'observer un risque avéré d'érosion : c'est-à-dire avec des observations de départs de sols et de transfert au cours d'eau via les fossés circulants (Photo 14, Photo 15). La mise en place de la végétation dans les fossés et l'état d'avancement des cultures au début de l'année 2016 (températures douces) n'a pas donné lieu à ces phénomènes d'érosion et de transferts d'eau marron au réseau hydrographique.

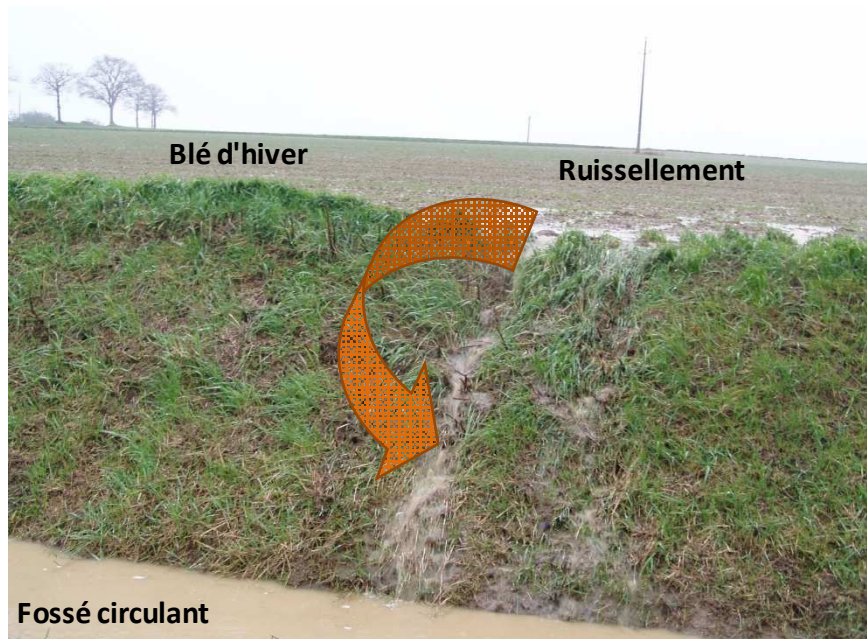


Photo 14 : Ruissellement sur blé d'hiver formant une eau marron enrichie en particules de sols se déversant dans un fossé circulant (photo prise hors BV lors de l'hiver pluvieux de 2013/2014)



Photo 15 : Fossé circulant véhiculant des eaux marron chargées en particules de sols provenant d'une parcelle située en amont (photo prise hors BV lors de l'hiver pluvieux de 2013/2014)

I.6. Cas particulier : rejet de fosse agricole

Un rejet de fosse agricole a été identifié de façon récurrente depuis 2011 entre la base nautique et la plage de Vioreau : la dernière occurrence date de l'été 2015.

Cet effluent brut représente du point de vue de la concentration, une véritable source d'ammonium et d'ortho phosphates facilement assimilables pour soutenir le développement et la multiplication des microalgues.

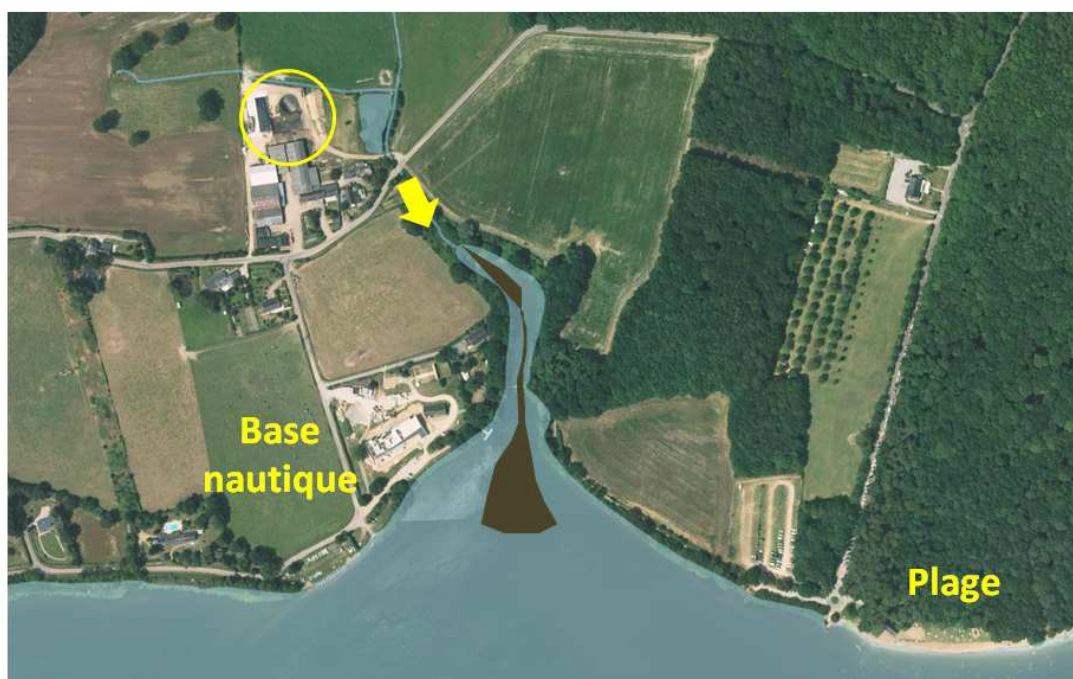


Figure 58 : Localisation du rejet avéré de la fosse agricole entre la base nautique et la plage

La présence de sièges d'exploitations sur le bassin versant de Vioreau et la densité de fosses agricoles ne peuvent se traduire en une carte du risque potentiel de transfert d'effluent au réseau hydrographique. L'exemple du rejet de la fosse ci-dessus reste un cas isolé, extrême, qui sera traité en direct avec l'exploitant.

I.7. Les résultats du suivi complémentaire

Ce suivi complémentaire avait pour objectif de mettre en perspective l'évolution de la qualité des eaux du Vioreau avec celle de ses tributaires.

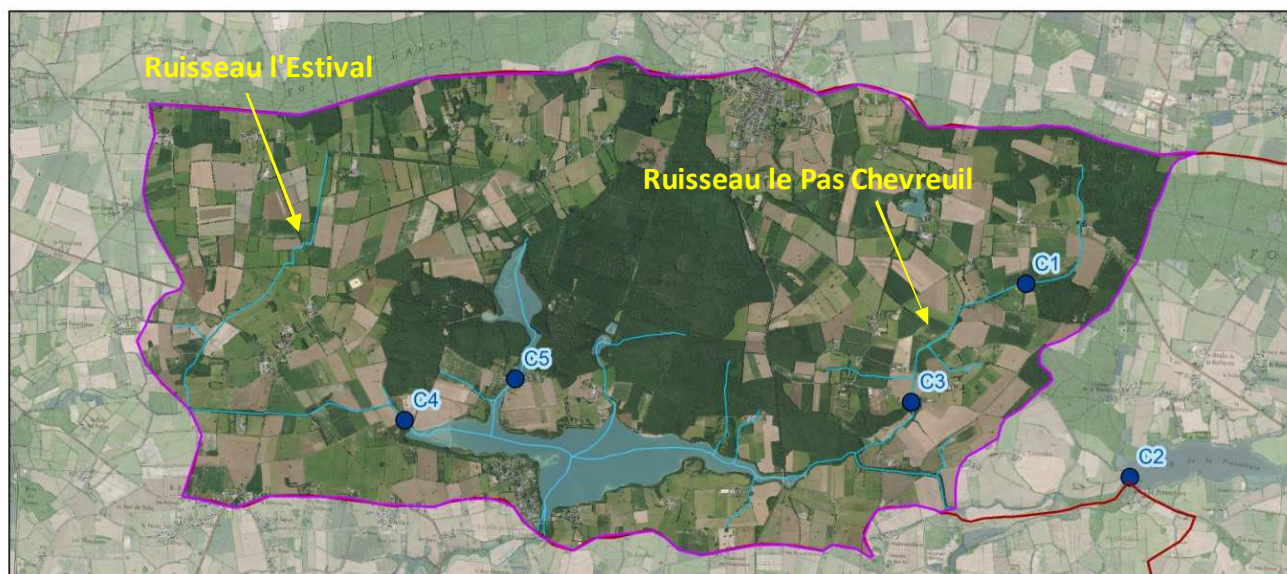


Figure 59 : zoom sur les 5 stations retenues

Le choix portait sur le lien entre ces eaux amont et l'apparition des blooms. Aussi 4 campagnes étaient concentrées sur la période printemps – été, et une seule campagne hautes eaux était figée.

Les conditions particulièrement sèches de l'hiver 2015-2016 ont fait évoluer le planning d'échantillonnage. De même, le manque d'eau estival a conduit à retirer une campagne estivale (eaux stagnantes dans les cours d'eau).

Les deux premières campagnes de juin et juillet 2016 présentent des cours d'eau peu minéralisés (Stations 1, 4 et 5), avec une modification de la signature par le rejet de la station d'épuration de la Meilleraye (station 3).

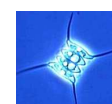
Campagne cours d'eau : 16/06/2015					
	1	2	3	4	5
Mesures in-situ					
conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	245	263	344	251	216
température ($^{\circ}\text{C}$)	18.3	20.1	18	18	18
Analyses					
P-PO4 en $\mu\text{g}/\text{l}$	31	6	223	12	4
Ptotal en $\mu\text{g}/\text{l}$	46	63	263	102	35
MES en mg/l	11	15	18	34	17
NH4 en mg/l	0.274	0.164	0.108	0.098	0.149
NO3 en mg/l	17.9	1.2	16.4	4.6	0.7
COD en mg/l	4.8	8.4	4.9	9.2	9.6
COT en mg/l	5.6	9.1	5.2	10.5	10.2
E.coli (UFC/100 ml)	400	9	20	312	15
Streptocoques (UFC/100 ml)	227	3	118	63	0

Tableau 6 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°1

Campagne cours d'eau : 03/07/2015					
	1	2	3	4	5
Mesures in-situ					
conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	222	205	365	210	219
température ($^{\circ}\text{C}$)	19	19.5	19.8	20.5	20
Analyses					
P-PO4 en $\mu\text{g}/\text{l}$	11	4	199	15	6
Ptotal en $\mu\text{g}/\text{l}$	20	15	288	21	16
MES en mg/l	8	7	11	4	5
NH4 en mg/l	0.081	0.178	0.254	0.066	0.028
NO3 en mg/l	6	1	11	2.3	1.1
COD en mg/l	2.5	4.5	4.1	8.8	7.8
E.coli (UFC/100 ml)	110	10	50	80	35
Streptocoques (UFC/100 ml)	25	4	38	14	9

Tableau 7 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°2

Les concentrations en ortho-phosphates sont relativement faibles exceptées à l'aval de la station (proches de 200 $\mu\text{gP}/\text{L}$), concentrations liées au rejet des effluents traités. Notons



que les débits sont alors faibles (<5 litres/s). Les paramètres associés (Ptotal et ammoniac) sont également les plus élevés au point n°3.

Les concentrations en matières organiques (COD et COT) sont observées avec les plus fortes concentrations sur les arrivées 4 et 5. Ce sont les eaux enrichies par le massif forestier et les zones humides qui provoquent cette signature particulière.

En lien avec l'usage baignade, les paramètres bactériologiques courants ont également été analysés. Il est important de souligner que les cours d'eau ne sont pas aseptiques. Les valeurs les plus élevées (raisonnables cependant <10³) ne sont pas mesurées à l'aval du rejet de la station de la Meilleraye (station 3).

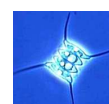
Campagne cours d'eau : 25/03/2016					
	1	2	3	4	5
Mesures in-situ					
conductivité (µS/cm)	251	268	310	293	231
température (°C)	11.1	11.4	11.8	10.9	10.8
Analyses					
P-PO4 en µg/l	7	4	106	20	16
Ptotal en µg/l	21	43	125	75	43
MES en mg/l	5.5	13	17	7	15
NH4 en mg/l	0.065	0.168	0.101	0.076	0.195
NO3 en mg/l	22	12	26	22	13
COD en mg/l	4.71	9.07	4.9	7.44	8.99
Chlorures	40.7	30.9	37.9	43.5	35.1
E.coli (UFC/100 ml)	180	170	60	25	100
Streptocoques (UFC/100 ml)	31	15	35	7	30

Tableau 8 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°3

Sans eaux chargées en MES pendant la période hivernale, nous avons attendu une réelle reprise des débits (peu importante), fin mars.

Cette nouvelle campagne valide les points précédents, avec la confirmation d'une contamination avérée au niveau du ruisseau n°1 avec des valeurs d'E.coli à 180 UFC/100ml.

En sortie d'hiver, sur le niveau le plus haut de la nappe, les nitrates apparaissent à leur niveau le plus haut (confirmé lors de la campagne d'avril). La concentration la plus élevée sur le Pas Chevreuil est de 26 mg/L, confirmée à 21 mg/L, un mois plus tard.



La dernière campagne printanière (débits encore présents, mais très faibles), n'apportera pas de nouveau résultat.

Campagne cours d'eau : 27/04/2016					
	1	2	3	4	5
Mesures in-situ					
conductivité (µS/cm)	245	263	344	251	216
température (°C)	10.8	13.2	10	10.1	14.8
Analyses					
P-PO4 en µg/l	35	7	251	14	5
Ptotal en µg/l	78	107	278	45	59
MES en mg/l	10	24	8	12	11
NH4 en mg/l	0.256	0.153	0.102	0.091	0.139
NO3 en mg/l	18	11	21	21	11
COD en mg/l	4.55	8.88	5.2	7.15	7.61
E.coli (UFC/100 ml)	55	44	35	88	50
Streptocoques (UFC/100 ml)	12	8	10	16	20

Tableau 9 : Analyses des eaux superficielles : Campagne n°4

Ensuite, les débits seront trop faibles pour caractériser les eaux du bassin versant (les eaux alors stagnantes, ne sont plus connectées au Vioreau).

BARRAGE				
	16/06/2015	03/07/2015	25/03/2016	27/04/2016
Mesures in-situ				
conductivité (µS/cm)	227	220	245	227
température (°C)	21	22	11.2	14.5
Analyses				
P-PO4 en µg/l	8	9	20	9
Ptotal en µg/l	57	21	50	96
MES en mg/l	40	15	12	23
NH4 en mg/l	0.119	0.178	0.176	0.111
NO3 en mg/l	4.4	2	13	11
COD en mg/l	8.6	8.8	10.2	9.45
E.coli (UFC/100 ml)	132	20	66	70
Streptocoques (UFC/100 ml)	0	0	5	15

Tableau 10 : Analyses des eaux superficielles : 4 campagnes au niveau du Barrage

Ces 4 campagnes ont permis d'appréhender les quelques cours d'eau du BV, et de comprendre comment l'alimentation en eau se faisait (modification significative des périmètres de bassins versants réels).

Les résultats des 4 campagnes permettent également de comparer les eaux du Lac, au niveau du Barrage et de la Plage, avec celles des bassins versants.

La conductivité est équivalente à celle des têtes de BV.

La température est naturellement plus élevée dans le plan d'eau.

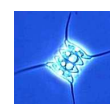
PLAGE				
	16/06/2015	03/07/2015	25/03/2016	27/04/2016
Mesures in-situ				
conductivité (µS/cm)	229	211	245	229
température (°C)	21	22.2	13.2	15.2
Analyses				
P-PO4 en µg/l	4	3	67	5
Ptotal en µg/l	35	12	86	56
MES en mg/l	38	22	12	12
NH4 en mg/l	0.047	0.088	0.193	0.044
NO3 en mg/l	4.6	2.1	13	11
COD en mg/l	8.6	9	9.28	8.88
E.coli (UFC/100 ml)	68	148	50	48
Streptocoques (UFC/100 ml)	0	15	10	12

Tableau 11 : Analyses des eaux superficielles : 4 campagnes au niveau de la plage

Les concentrations en ortho-phosphates sont faibles, à très faibles au niveau du barrage. Un pic à 67 µg P/l est noté devant la plage en mars 2016, confirmé par une valeur de Ptotal très proche.

Les concentrations en MES sont par contre plus élevées que celles des tributaires, mais ce ne sont plus les mêmes éléments solides qui sont ici mesurés. Ce sont des micro algues et non plus des particules de sols du bassin versant.

Il est intéressant de souligner le changement de rapport P-PO4/Ptotal. Les ortho-phosphates ne sont plus la première forme de phosphore dans la colonne d'eau. Nous pouvons entrevoir ici du phosphore (non soluble) qui est concentré et retenu dans les algues.



Les valeurs de COD supérieures à 8 mg C/l sont importantes, mais correspondent à la résultante d'un fonctionnement interne du plan d'eau, car les eaux des tributaires sont largement plus faibles, sur le secteur Est.

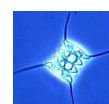
Le phosphore apparent biodisponible, n'est pas en forte concentration (résultat valide lors des profils en long), car il n'est qu'apparent à un instant t. C'est la complexité de l'étude de la dynamique du phosphore dans les milieux aquatiques vivants. Le phosphore passe d'un compartiment à un autre, dissous puis adsorbé sur du particulaire, et à nouveau dissous.

Le phosphore total est présent avec plusieurs dizaines de µg P/L. Nous avons donc dans la colonne d'eau devant la plage et au niveau du barrage une quantité potentiellement disponible pour le développement algair, si les conditions externes sont favorables.

La qualité sanitaire est également reprise par la bactériologie. Les concentrations ne sont pas nulles pour E.coli, mais assure le classement Excellent pour la baignade à cette plage.

		Entérocoques intestinaux			
		Percentile 95 < 200	200 < Percentile 95 < 400	Percentile 95 > 400 et Percentile 90 < 330	Percentile 90 > 330
<i>Escherichia coli</i>	Percentile 95 < 500	Excellente	Bonne	Suffisante	Insuffisante
	500 < Percentile 95 < 1000	Bonne	Bonne	Suffisante	Insuffisante
	Percentile 95 > 1000 et Percentile 90 < 900	Suffisante	Suffisante	Suffisante	Insuffisante
	Percentile 90 > 900	Insuffisante	Insuffisante	Insuffisante	Insuffisante
		Insuffisante	Insuffisante	Insuffisante	Insuffisante

Tableau 12 : Classement des zones de baignade selon la directive 2006/7/CE



I.8. Autres sources : pêcheurs, oiseaux et poissons

Nous chercherons dans ce chapitre à évaluer la part de ces 3 types d'apport, sachant que leur intervention sur le cycle du phosphore recoupe des modalités différentes : la pêche, à travers de l'appâtage, constitue une source d'apports potentiels d'origine externe au système, alors que l'alimentation des poissons et des oiseaux intervient principalement sur la forme (assimilable ou non pour le phytoplancton) du stock interne de phosphore de la masse d'eau.

• Pêche et appâtage

Cette estimation a été réalisée en 2 temps:

1- Caractérisation de la capacité de relargage de phosphore par des farines d'appâtage courantes

Les 6 farines utilisées ont été achetées dans le commerce, et regroupent 3 marques connues de tarif moyen (2.40 à 6.30 euros/kg). Elles étaient toutes composées sur base végétale: déchets d'aliments pour animaux, céréales, déchets d'industrie boulangère, additifs et agents de sapidité.

Les essais d'extraction ont été réalisés sur 24 heures en 8 fractions de 200 ml. Après extraction chaque volume d'eau était remplacé par une nouvelle fraction, afin de simuler le renouvellement de la masse d'eau autour des farines.

Les résultats montrent une cinétique de relargage très rapide: en moyenne, 38 % des phosphates étaient relargués dans les 2 premières heures, 60 % sous 4 heures, et 90 % sous 8 heures. Il n'y avait plus de relargage observable passé 20 heures, et l'essai a été stoppé à bout de 24 heures.

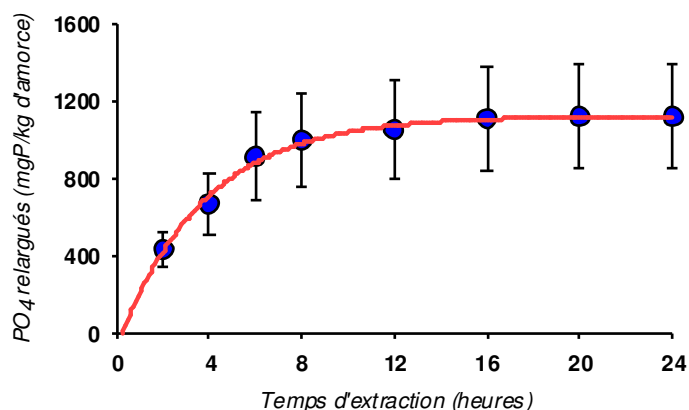
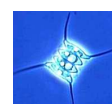


Figure 60 : Relargage de PO4 par les 6 farines d'appâtage testées en 2016



Au final, la somme cumulée des phosphates extraits en 24 heures atteignait une moyenne de 1.1 +/- 0.2 grammes de P, soit 3.5 +/- 0.6 grammes de PO₄, par kg de farine.

En parallèle, une analyse de la composition globale en azote, phosphore et matière organique des farines a montré qu'elles contenaient de 270 à 455 g de carbone organique, de 13 à 20 grammes d'azote organique et de 2.8 à 4.3 grammes de P total par kilo (en poids sec).

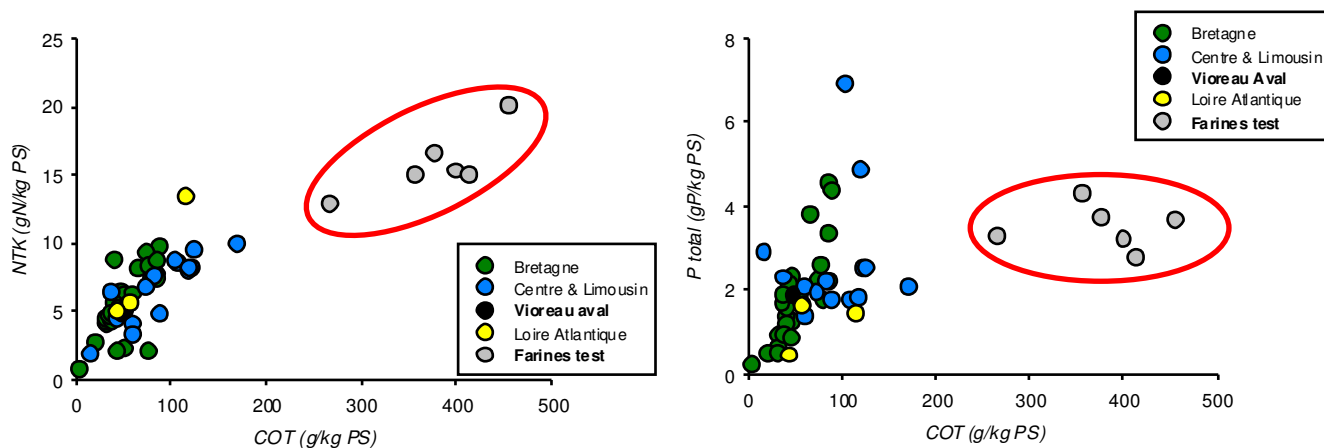


Figure 61 : Contenu en COT, NTK et P total des 6 farines d'appâtage testées en 2016 comparé aux sédiments lacustres de la base AELB

Comparées aux données disponibles sur les sédiments des lacs suivis par l'AELB dans le cadre du RCS, les farines d'appâtage testées étaient donc, en moyenne, 4 fois plus riches en carbone, 2.2 fois plus riches en azote et 1.6 fois plus riches en phosphore que des vases lacustres.

2- Exploitation de l'enquête de fréquentation pour évaluer la contribution des appâts à l'eutrophisation du lac

L'impact de l'appâtage, qui est un apport de phosphore externe au système lac + bassin versant, a été évalué grâce aux résultats de l'enquête de fréquentation réalisée pour la Fédération Départementale de la Pêche pendant l'été 2016.

L'enquête indique que 41 % des pêcheurs appâtent, et que 37 % pêchent la carpe dont 75 % sur des parcours de nuit. Compte-tenu des relevés de fréquentation, le nombre moyen de pêcheurs pour les modalités pêche de jour et pêche de nuit a pu être estimé pour chaque mois de mai à octobre (soit 93 à 303 équivalents pêcheurs par mois); Les participants de l'enduro carpe de septembre y ont été ajoutés (soit 51 binômes pendant 3 jours).

A partir des résultats de relargage des farines, et en intégrant un facteur 2 pour tenir compte des variations interannuelles de fréquentation, l'apport total en phosphore a pu être évalué à un total de 17 à 35 kg pour 6 mois, dont 5 à 10 kg sous forme de phosphore dissous (phosphates) directement assimilables par le phytoplancton.

On peut noter que si l'appâtage de jour représente 25 % des apports (75 % de nuit), l'enduro contribue, en 3 jours, à près de 53 % des apports de phosphore pendant la saison estivale.

• Oiseaux

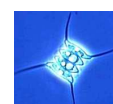
L'impact des oiseaux d'eau sur la qualité du milieu aquatique et le cycle du phosphore a souvent été étudié: on peut citer par exemple Brabrand et al., 1990; Marion et al., 1994; Hahn et al., 2007; Unckless et al., 2007, Chaichana et al., 2010, Somura et al., 2015...

Ramenés à une moyenne par individu, les taux d'apport en phosphore atteignent en moyenne 0.01 gP/jour pour les petits oiseaux terrestres, 0.04 à 0.08 gP/jour pour les oiseaux d'eau de petite taille (mouettes, foulques, grèbes...), 0.2 à 0.4 gP/jour les canards, 0.5 à 0.8 g/jour pour les oies et cygnes, mais 3 à 4 gP/jour pour les cormorans et hérons, régime piscivore obligé.

A partir des relevés réalisés par la LPO, nous avons reconstitués les populations présentes de mai à octobre sur le site du Vioreau: les effectifs moyens totaux évoluent ainsi, au cours de la saison estivale, de 140-160 individus en mai-juin à un maximum de 1 000 à 1 900 individus en septembre et octobre.

Les apports en phosphore suivent l'évolution des effectifs, passant de 1.6 à 1.7 kgP/mois en mai-juin à 7-9 kgP/mois en fin de saison. Au total, les apports associés aux oiseaux représentent un total de 32 kg en 6 mois, dont 11 kg sous forme de phosphates assimilables. Ces apports peuvent avoir une origine mixte, interne au lac (oiseaux piscivores) ou au bassin versant, mais également externe (oiseaux se nourrissant à l'extérieur du système lac + bassin).

Les parts respectives des modes d'alimentation ne peuvent pas être évaluées pour l'ensemble de la population, mais si on considère que les piscivores (hérons, aigrettes, cormorans) se nourrissent exclusivement sur place, alors 30 % du phosphore excrété dans le lac peut être considéré comme du recyclage local, et non comme un apport externe.



• **Poissons**

Les travaux sur l'impact des poissons sont plus rares, la plupart des analyses de régimes alimentaires concernent des essais d'alimentation en élevage pour augmenter leur productivité, et n'apportent pas d'information exploitable pour une transposition en milieu naturel. On peut citer Bureau & Cho, 1999, ou Gwaizdia et al., 2014, mais ces deux études reprennent sous des formes modifiées les mêmes données initiales.

On peut noter que les poissons présentant le plus d'impact sont les Brêmes, en raison de leurs habitudes fouisseuses (72 mgP/kg de poids corporel), puis les carnassiers (régime piscivore: 50 mgP/kg), et enfin les autres poissons blancs (ablettes, gardons, etc...), avec 25 à 50 mgP relargué par jour et par kg de masse corporelle.

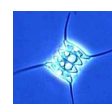
Ne disposant pas de relevés de biomasse, nous avons demandé l'avis du BE Fishpass, qui a estimé que le Vioreau, lac très productif, pouvait héberger 50 tonnes de poissons pour 300 ha de surface en eau.

Nous avons distribué ces 50 tonnes en trois classes: 10 t de grosses carpes, 2 t de gros carnassiers, et 38 tonnes d'autres poissons (blancs et petits carnassiers), répartis selon la distribution des biomasses observées lors des pêches organisées pour le RCS (données AELB): on obtient ainsi un peuplement comprenant, en masse, 40 % de Brêmes, 29 % de gardons et assimilés, 29 % de perches et de petits sandres...

Cette distribution permet d'estimer les apports de phosphore à environ 95 kgP en 6 mois, dont 47 kg sous forme de phosphates directement assimilables par les cyanobactéries et la flore. Ces apports peuvent être attribués à 44 % aux grosses carpes, 19 % aux gros carnassiers, et 34 % aux autres groupes piscicoles.

• **Bilan**

Les trois sources conjuguées que constituent la pêche, les oiseaux et les poissons peuvent contribuer, en première approximation, à un apport équivalent à 140 kg de Phosphore dans la masse d'eau du Vioreau pendant les 6 mois favorables à la croissance des cyanobactéries. Ces apports en sont cependant pas distribués de manière homogène sur la saison: nous n'avons pas de données saisonnières sur le peuplement piscicole, mais les relevés de fréquentation par les pêcheurs et les oiseaux montrent clairement une augmentation du printemps vers l'automne, avec un point culminant en août-septembre: en fin d'été, le cumul des populations aviaires, de la forte fréquentation et de l'enduro carpe comptent alors pour ¼ de l'ensemble des apports sur 6 mois.



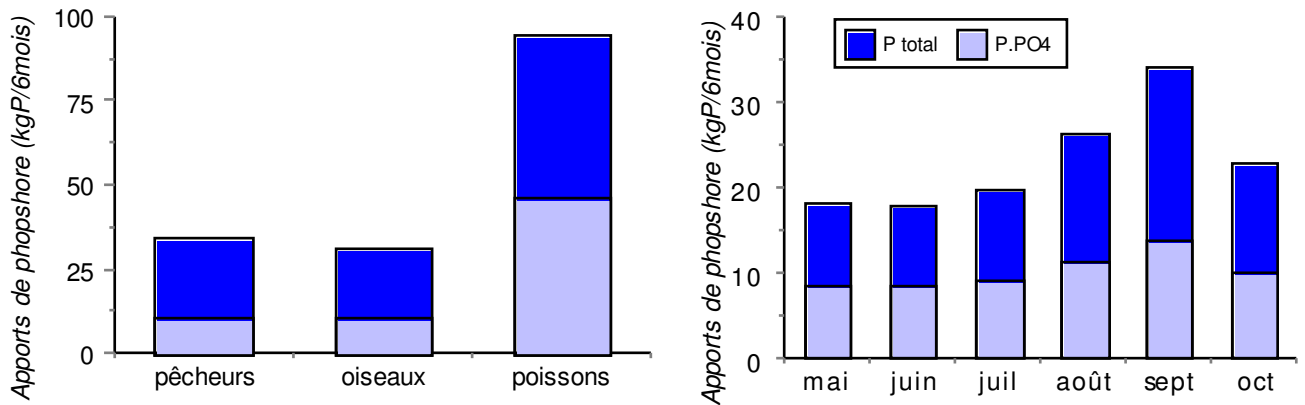
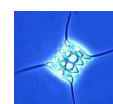


Figure 62 : Distribution des formes de phosphore par catégories et par mois

Il faut cependant garder à l'esprit que ces sources ne sont pas équivalentes : Les farines d'appâtage sont strictement externes au système, et constituent des apports nets à la masse d'eau. Le régime alimentaire des oiseaux est d'origine mixte, pour partie externe au bassin-versant. Les apports des poissons, en revanche, sont strictement internes au lac (si on excepte la part constituée par les farines) et représentent plus un mécanisme d'accélération du recyclage qu'un apport au sens strict du terme.



II. Fonctionnement hydro-biologique de Vioreau

II.1. Emergence du bloom de 2016

La dynamique de développement des cyanobactéries a été étudiée au cours de 7 campagnes de terrain réalisées entre juin 2015 et octobre 2016. Ces campagnes consistaient en une série de 12 profils verticaux permettant, par la mesure des concentrations en phycocyanines, d'identifier la distribution spatiale des cyanobactéries dans la masse d'eau. Elles ont été réalisées, après surveillance de la masse d'eau, au cours d'étapes-clés permettant de caractériser l'émergence, l'expansion puis la régression saisonnière de la biomasse.

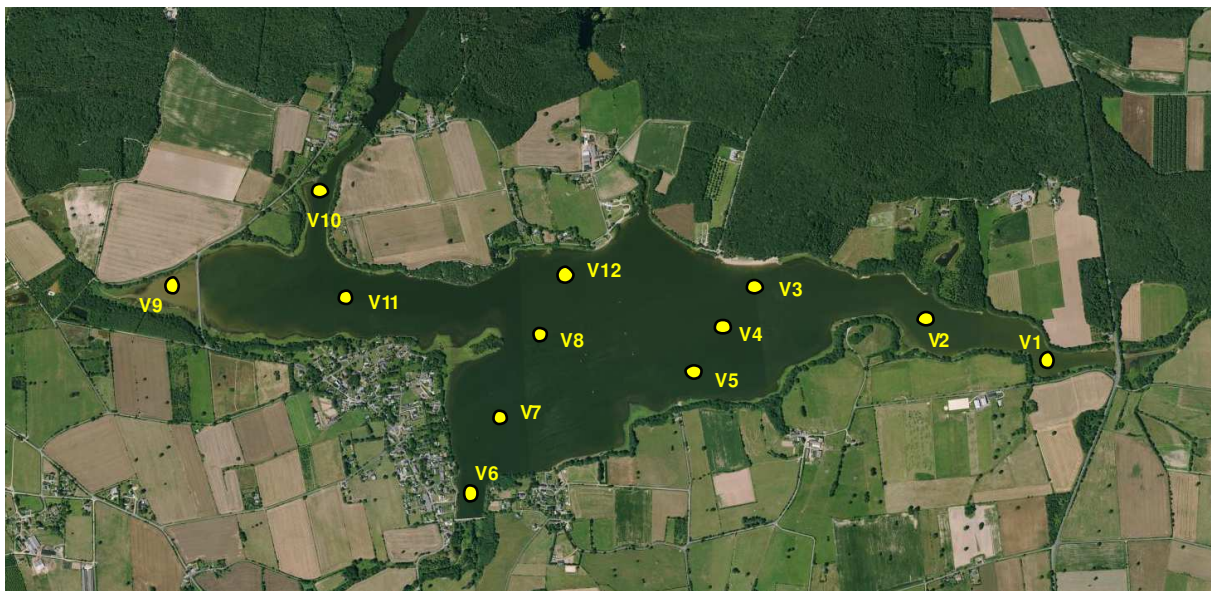


Figure 63 : Distribution des points de mesure pour les campagnes de terrain en 2015 et 2016

Au cours de ces campagnes, la composition floristique s'est avérée homogène, avec une large dominance des effectifs et de la biomasse par des espèces flottantes et connues comme potentiellement productrices de microcystines : *Woronichinia naegeliana* et *compacta*, *Microcystis aeruginosa*, *flos-aquae*, *viridis* et *weisenbergii*, *Peudanabaena mucicola*... Ces espèces étaient associées à des productrices potentielles d'anatoxine : *Aphanizomenon flos-aquae* et *issatschenkoï*, *Anabaena planctonica*...

Les phases de développement des cyanobactéries sont apparues similaires en 2015 et 2016 avec des décalages temporels liés aux particularités météorologiques de chaque année (notamment le printemps pluvieux de 2016). Pour plus de clarté dans l'exposé, les 4 étapes-clés présentées ci-dessous ont été choisies parmi les résultats des 2 années pour être les plus illustratives des processus en jeu dans le lac de Vioreau.

Pour souci d'homogénéité, toutes les figures des 4 campagnes seront représentées de la même manière, c.a.d. sous forme de cartographie de densités cellulaires, soit en vue plannaire couvrant l'ensemble de la superficie du lac, soit en coupe verticale selon les axes Est-Ouest (avec l'Est à gauche de la figure) et Nord-Sud (avec le Sud à gauche du schéma).

1- Emergence (08/06/2016)

Les mesures réalisées début juin, par temps clair et vent insensible, sont présentées Figure 64X et suivantes. Elles montrent que les densités cellulaires maximales étaient rencontrées entre 1.5 et 2.5 mètres sous la surface, et augmentaient de l'amont (à l'Est : 8 à 10 000 cell/ml) vers l'aval (exutoire au Sud, avec 14 à 16 000 cell/ml).

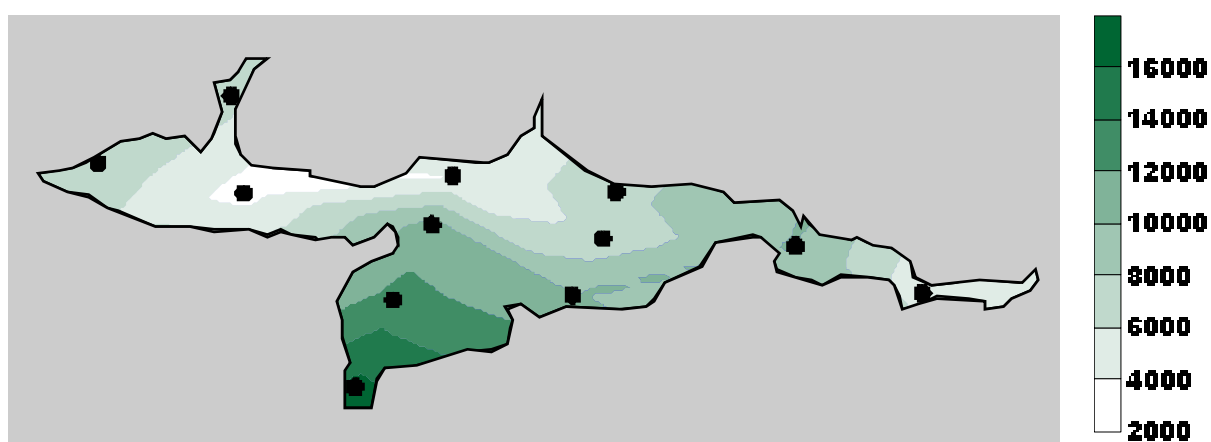


Figure 64 : Répartition spatiale des densités maximales de cyanobactéries (cell/ml) le 08/06/2016

La distribution verticale des cyanobactéries, examinée selon l'axe Est-Ouest, dos à la base nautique et face au barrage, montrait des concentrations croissantes à partir du fond, avec une extension vers la surface de la masse d'eau au droit de la plage (Figure 65).

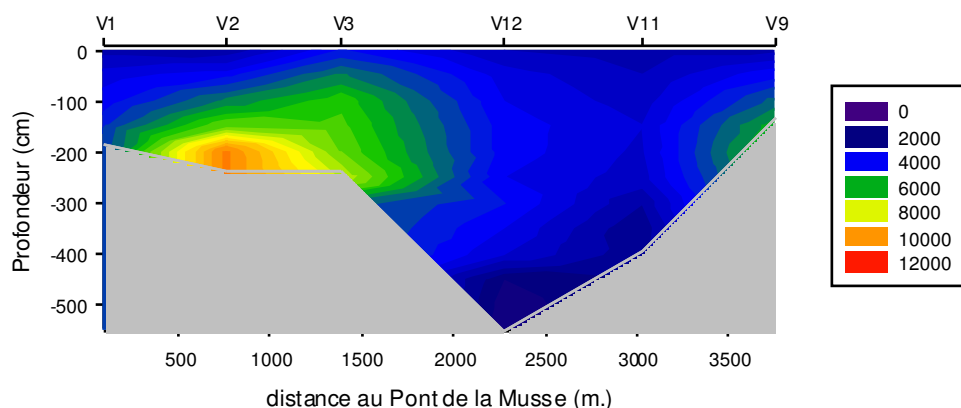
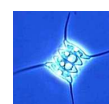


Figure 65 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest



Examinée selon l'axe Base Nautique-Barrage (grossièrement Nord-Sud), elle montrait que les cyanobactéries étaient présentes jusqu'à 4 mètres sous la surface, avec un maximum entre -1.5 et -2 mètres, suivant le cheminement de la lame d'eau tirée vers le barrage par la surverse et la vanne active (Figure 66).

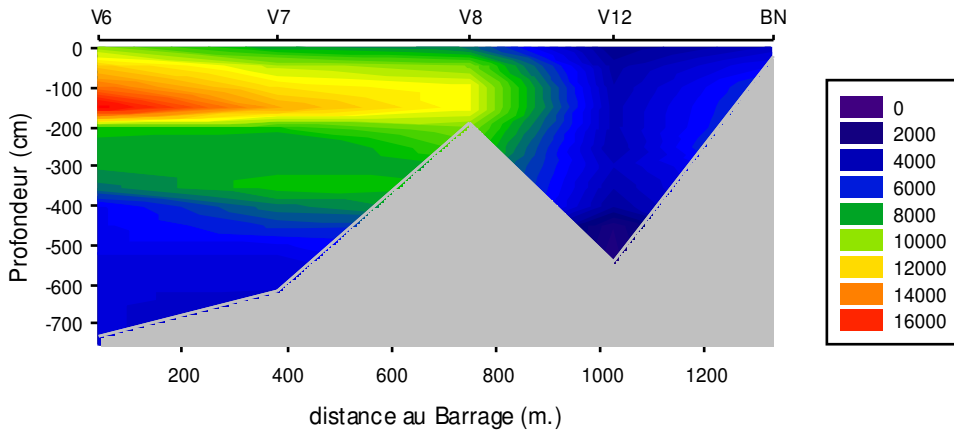


Figure 66: Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud

Les concentrations mesurées en profondeur montraient que les cyanobactéries étaient présentes à la surface des vases dans toute la zone captant de la lumière, c.à.d. avec une profondeur inférieure à la profondeur de Secchi, soit jusqu'à 4-5 mètres sous la surface, et majoritairement dans la queue de retenue Est, qui constituait à cette occasion la zone d'émergence privilégiée (Figure 67).

En termes de progression spatiale, les cyanobactéries, partant du fond de tout le flanc Est avec des densités cellulaires de 10 à 12 000 cell/ml, colonisaient la masse d'eau en atteignant la lame d'eau de surface au droit de la plage face à la zone de baignade. Elles suivaient ensuite les écoulements préférentiels vers le barrage dans un vaste virage vers le Sud pour atteindre un maximum de 14 à 16 000 cell/ml à l'amont immédiat de la digue, à 1.5 mètres sous la surface.

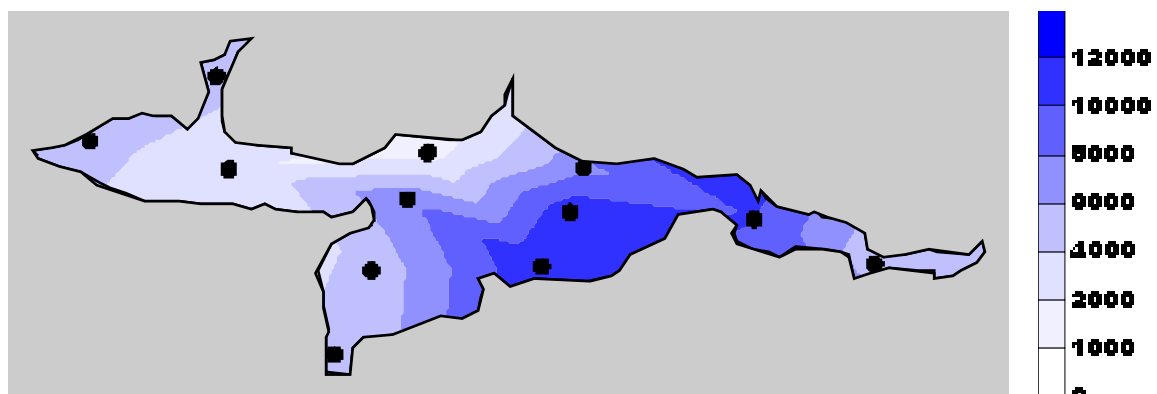
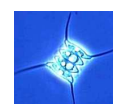


Figure 67 : Répartition spatiale des densités de cyanobactéries présentes à la surface des vases (cell/ml)



2- Colonisation de la masse d'eau (03/07/2015)

Au cours de la seconde campagne, dans l'ensemble du lac la composition floristique était homogène aussi bien en termes d'espèces que d'effectifs, avec des densités cellulaires de 60 à 90 000 cell/ml dans une lame d'eau s'étendant jusqu'à 1.5 mètres sous la surface.

On pouvait alors noter la présence d'un front de bloom en progression de l'amont Est vers le barrage (SSW). Ce front était localisé au droit de la baignade, avec une densité cellulaire maximale, à 1 mètre sous la surface, de 86 600 cell/ml dont 76 % d'espèces connues comme productrices potentielles de microcystines.

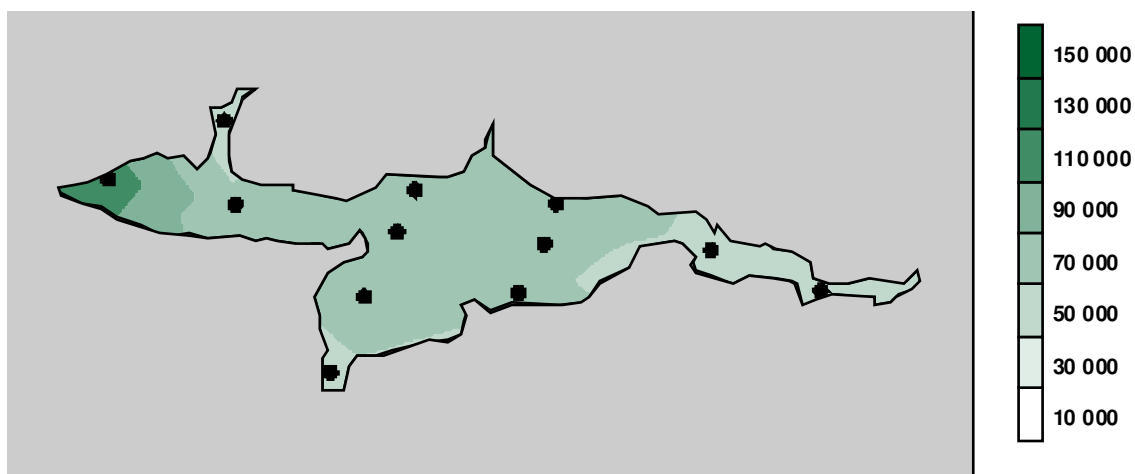


Figure 68 : Répartition spatiale des densités maximales de cyanobactéries (cell/ml) le 03/07/2015

Selon l'axe Est-Ouest, les cyanobactéries étaient plus particulièrement concentrées dans le bras Ouest de la retenue, au-delà de la confluence avec le bras du Haut Vioreau, où elles atteignaient 120-140 000 cell/ml sur le fond. Cette distribution pouvait être liée aux forts vents d'E à SE présents le 03/07 et les jours précédents, repoussant les espèces flottantes vers l'Ouest de la retenue.

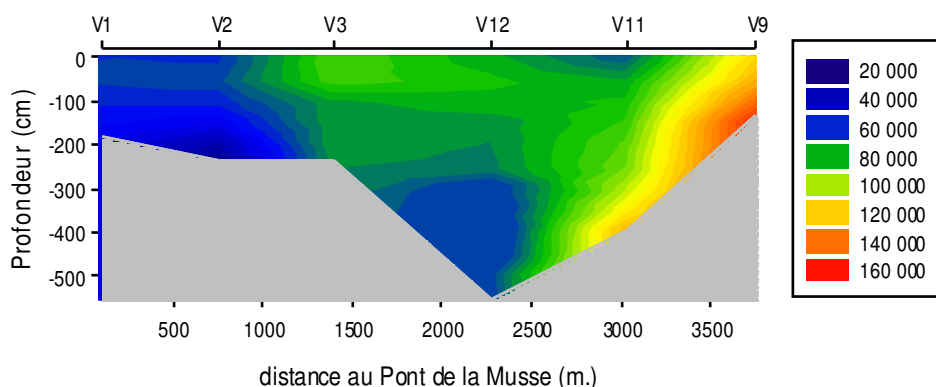
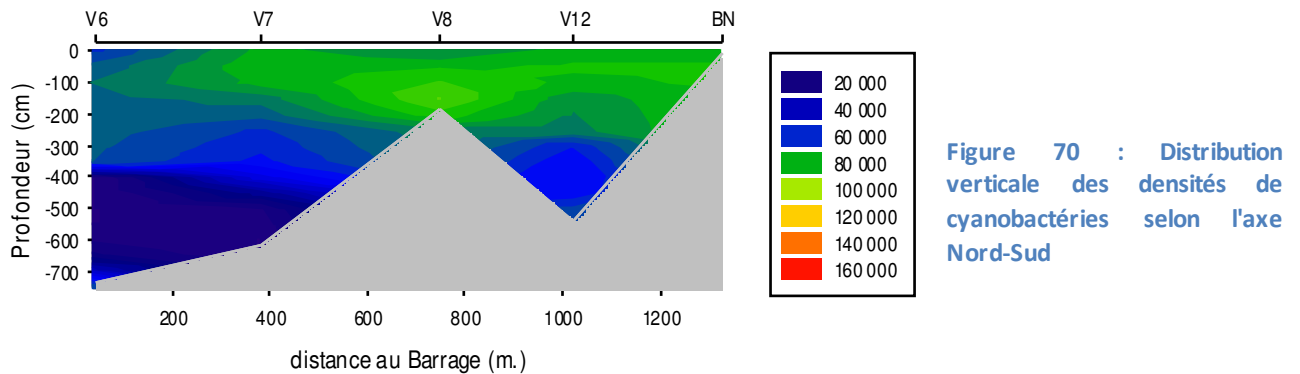


Figure 69 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest

Selon l'axe base nautique – barrage (NNE-SSW), qui correspond grossièrement au plan de plus grande pente, on retrouve sur la profondeur le panache du front de bloom en progression vers le barrage et entraîné par la masse d'eau, indépendamment du vent. La zone de plus forte densité (80-100 000 cell/ml, située 1 mètre sous la surface, était alors en train de passer la pointe de la presqu'île de la Demenure.



Comme en juin, le mouvement global des cyanobactéries suivait donc celui de la masse d'eau avec un écoulement préférentiel de l'Est du lac vers le barrage. Les pointes de densité visibles dans le bras Ouest paraissent avant tout dépendantes du vent, même si une seconde phase d'émergence depuis les sédiments n'était pas à exclure.

On doit cependant noter que, lors de cette campagne, les effectifs de cyanobactéries à la surface des sédiments, dans le secteur Ouest, étaient minima et en général inférieurs à 20 000 cell/ml. La première phase de recrutement/émergence depuis les vases paraissait donc terminée sur la majorité de la surface des fonds.

4- Expansion estivale (12/08/2016)

On retrouvait, au cours de cette campagne, une distribution des densités maximales à 1 mètre sous la surface. En termes de composition, les espèces présentes étaient toujours les mêmes qu'au cours des autres campagnes, avec des productrices potentielles de microcystines pour 86 % des effectifs, d'anatoxine pour 20 %, et de saxitoxine/cylindrospermopsine pour 17 %.

Les densités minimales, de 55 à 65 000 cell/ml, étaient localisées dans le quart SE du lac. Dans les queues de retenue, les densités cellulaires atteignaient en revanche 100-130 000 cell/ml à l'ouest et 90-140 000 cell/ml à l'Est. Le secteur aval proche du barrage, enfin, regroupait à nouveau les maximales, comprises entre 180 et 220 000 cell/ml entre 0 et 2 mètres sous la surface.

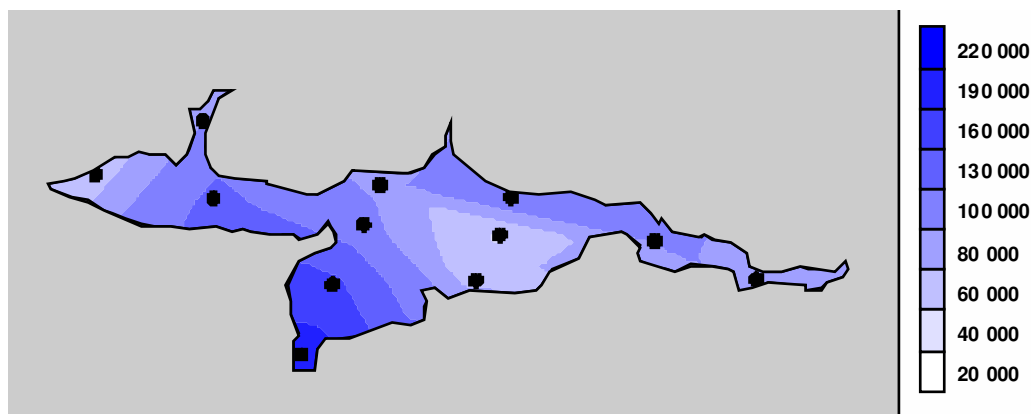


Figure 71 : Répartition spatiale des densités de cyanobactéries présentes à la surface des vases (cell/ml)

En termes de distribution verticale, selon l'axe Est-Ouest, on pouvait noter un nouvel épisode d'émergence depuis les fonds de la queue de retenue Est, avec des densités cellulaires de 140 à 180 000 cell/ml à la surface des vases du second méandre. Comme au cours des précédents épisodes, les cyanobactéries atteignaient les eaux de surface au droit de la plage.

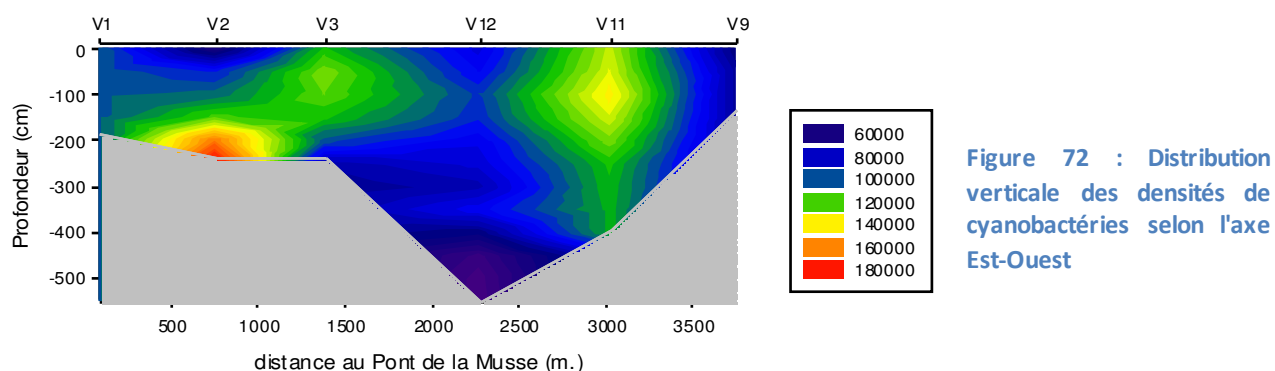


Figure 72 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest

La queue de retenue Est, en revanche, hébergeait un front de bloom en progression à partir de la confluence avec le bras du Petit Vioreau, sans trace d'émergence depuis les sédiments.

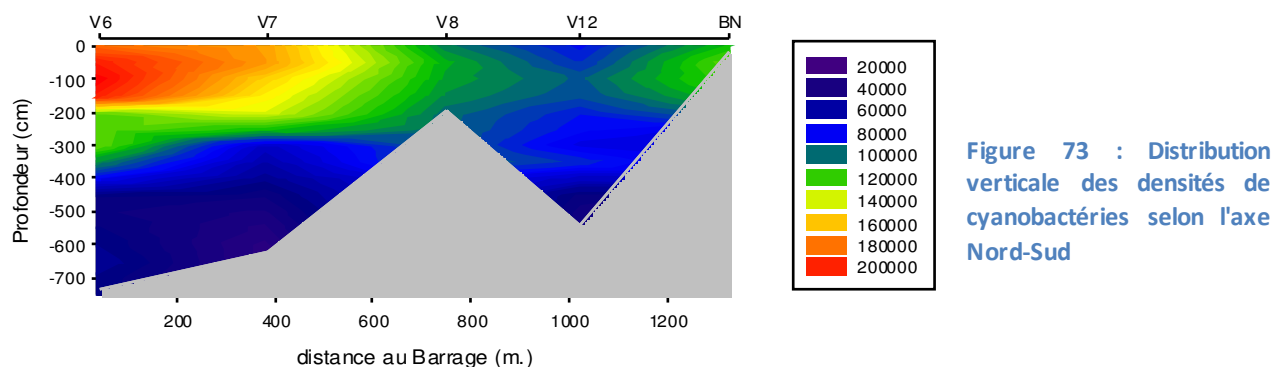
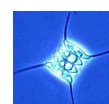


Figure 73 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud



Selon l'axe Nord-Sud, enfin, les cyanobactéries étaient toujours concentrées aux abords du barrage, avec des effectifs importants (> 100 000 cell/ml) présents jusqu'à 4 mètres sous la surface.

3- Régression automnale (25/09/2015)

Cette dernière campagne complète a été réalisée en début d'automne, sous vent faible de SSW. Elle montrait, pour les eaux de surface, des effectifs en régression saisonnière, avec des maximales comprises entre 60 et 100 000 cell/ml dans le secteur le plus aval, où la digue du barrage permet d'assurer une protection minimale contre le vent et les perturbations.

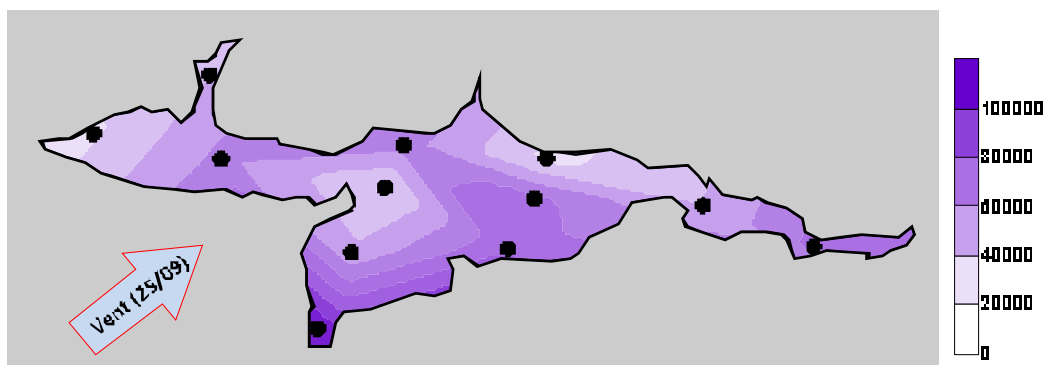


Figure 74 : Répartition spatiale des densités de cyanobactéries présentes à la surface des vases (cell/ml)

Les queues de retenue montraient des densités intermédiaires (de 40 à 65 000 cell/ml); le quart Sud-Est paraissait jouer un rôle d'accumulateur (fonction de la direction des vents), avec des densités relativement élevées (60 à 70 000 cell/ml) le long du flanc Sud-Est de la masse d'eau.

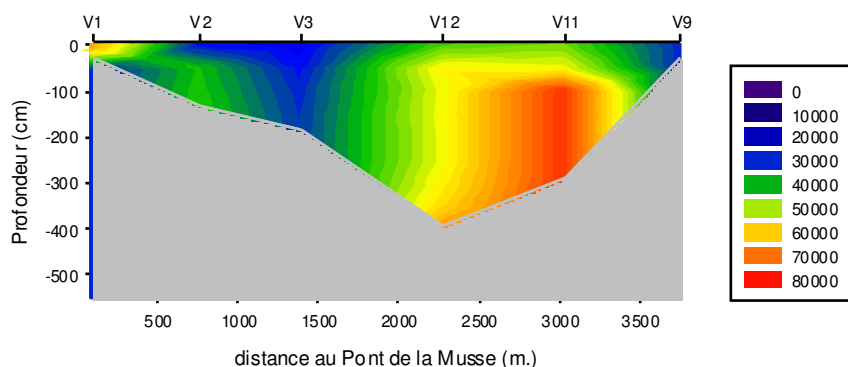
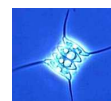


Figure 75 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Est-Ouest



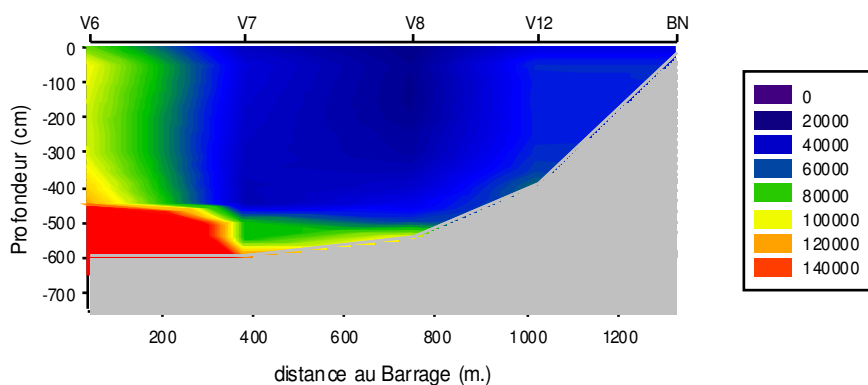


Figure 76 : Distribution verticale des densités de cyanobactéries selon l'axe Nord-Sud

En parallèle, la distribution verticale des densités suivait un nouveau schéma indiquant une migration des cyanobactéries vers les fonds. Selon l'axe Est-Ouest, les densités cellulaires étaient en effet uniformes du fond jusqu'à 1 mètre sous la surface, et les maximales pouvaient atteindre 50 à 80 000 cell/ml dans le bras Ouest.

Selon l'axe Nord-Sud, les effectifs étaient relativement homogènes jusqu'à l'entrée du goulet conduisant au barrage. A proximité de la digue, on pouvait observer à la fois un premier pic à 1 mètre sous la surface (avec 100 000 cell/ml) puis, à partir de -4 mètres, une augmentation rapide au-delà de 140 000 cell/ml dans une lame de 1.5 mètre au-dessus du fond.

Cette configuration, en début d'hiver, a déjà été observée par ailleurs dans d'autres lacs bretons, ainsi que par Minyvel au cours de la réalisation du profil de baignade, et confirmée par des mesures ponctuelles réalisées au cours d'une campagne complémentaire en janvier 2017. Elle illustre une réaction de fuite hivernale des cyanobactéries vers les profondeurs du lac, peut-être en réaction face aux perturbations et à la chute des températures en surface.

II.2. Paramètres aggravants pour le soutien des blooms

Un lac n'est pas un système fermé, mais un réacteur ouvert qui reçoit des nutriments et de l'énergie (sous forme de chaleur et de lumière) et les convertit en biomasse, phytoplancton puis zooplancton et faune, piscicole et aviaire principalement.

Cette dynamique est relativement lente, et les phases d'apparition et de croissance de la flore planctonique ne sont généralement pas opérées dans les mêmes compartiments du lac. On peut ainsi distinguer des zones d'émergence et de recrutement, en général envasées et peu profondes, souvent sur les haut-fonds des zones estuariennes en secteur amont. Bien exposées et alimentées en nutriments par les affluents, elles hébergent en général les premières étapes de développement du plancton.

Les zones médianes sont souvent peu chargées en flore planctonique, ce sont des secteurs de transfert de la flore entre amont et aval. Moyennement profondes, elles sont souvent très exposées au vent et aux turbulences, rarement stratifiées, et les apports en nutriments sont épisodiques.

Les zones aval, enfin, constituent des zones d'accumulation de la flore produite plus en amont. Elles sont souvent abritées et protégées par les abords du barrage (enrochements, vallée encaissée...), ce qui permet la stabilisation et le réchauffement, voire la stratification thermique des eaux. Dans ces secteurs, la disponibilité des nutriments est marginale (la masse d'eau a été épuisée par la flore pendant son trajet), et leur renouvellement est soumis à l'intensité et à la fréquence des relargages depuis les sédiments, ainsi qu'au mélange turbulent des eaux profondes (riches en nutriments) et des eaux de surface (riches en biomasse mais pauvres en nutriments).

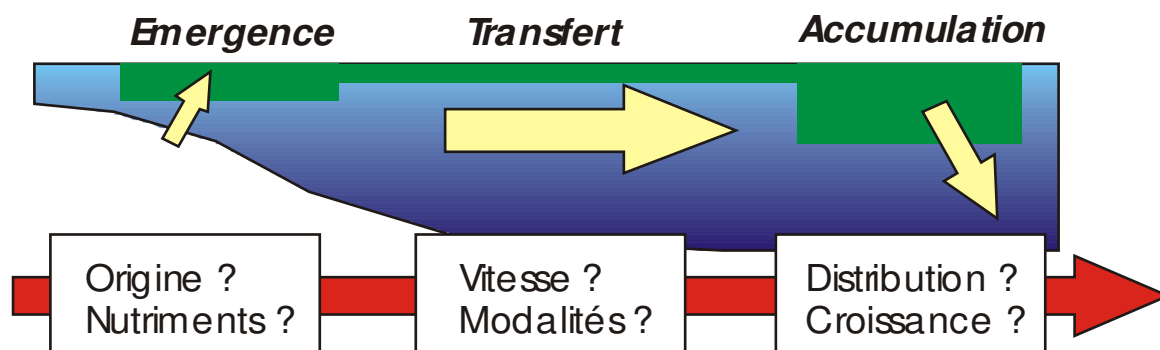


Figure 77 : Schéma synthétique illustrant l'évolution de la biomasse planctonique dans les compartiments d'un lac

Indépendamment des conditions spécifiques aux années concernées par l'étude de terrain (soit 2015-2016), certains paramètres sont plus particulièrement importants pour expliquer l'intensité des blooms observés dans le lac. Parmi ces paramètres, nous évaluerons successivement les secteurs favorables à l'émergence des blooms, l'influence du domaine climatique et de la météo estivale, puis la morphologie et l'hydrologie du lac.

II.3. Secteurs d'apparition des cyanobactéries

Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance de certains secteurs du lac comme zone de recrutement des cyanobactéries en début d'été. Une émergence ne suffit cependant pas à constituer un bloom, et toutes les zones de haut fond ne sont pas capables de permettre d'assurer le recrutement initial des cyanobactéries.

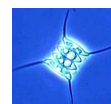
Les secteurs concernés doivent recevoir de la lumière, mais pas trop puisque les photosystèmes des cyanobactéries sont peu protégés contre la photooxydation (en cas de lumière trop forte). Il s'agira donc de zones peu profondes s'étendant de -1 mètre sous la surface à l'ensemble de la profondeur de Secchi, soit dans le cas des 2 printemps suivis jusqu'à -4 à -5 mètres.

La croissance de la biomasse nécessite également un soutien trophique. Les zones à risque peuvent être délimitées en fonction des concentrations en oxygène sur le fond. Dans le cas du Vioreau, les zones d'anoxie riches en nutriments sont situées, au printemps, sous -5 mètres de profondeur, et ne peuvent alors constituer une source d'alimentation pour les cyanobactéries: ces eaux sont inaccessibles à cause de la stratification thermique, et trop profondes pour recevoir de la lumière.

Les zones en fort déficit d' O_{2d} (saturation inférieure à 50%, concentrations de 1 à 3 mg/l) sont par contre une source potentielle de nutriments: s'étendant entre -5 et -3 mètres elles ne sont pas stratifiées, et sont sujettes à des phases d'anoxie ponctuelle (en période nocturne par exemple) qui peuvent assurer l'alimentation en nutriments de la biomasse.

Ces secteurs favorables à l'émergence peuvent être identifiés par recoupement des zones éclairées et en déficit d' O_{2d} (Figure 78); ils comprennent les secteurs exposés à la lumière jusqu'au fond sur les bords de la plaine centrale du lac, et sur les flancs Sud-Ouest et Nord-Est des queues de retenue.

Ces zones de recrutement peuvent de plus remonter vers l'amont au fur et à mesure de la stabilisation des conditions météorologiques en cours d'été: les températures plus élevées permettent le recyclage rapide de la matière organique et la fourniture de nutriments. En parallèle, l'augmentation de la turbidité des eaux (avec la densité de la flore) permet que les



hauts fonds reçoivent des intensités lumineuses plus facilement supportables par les cyanobactéries.

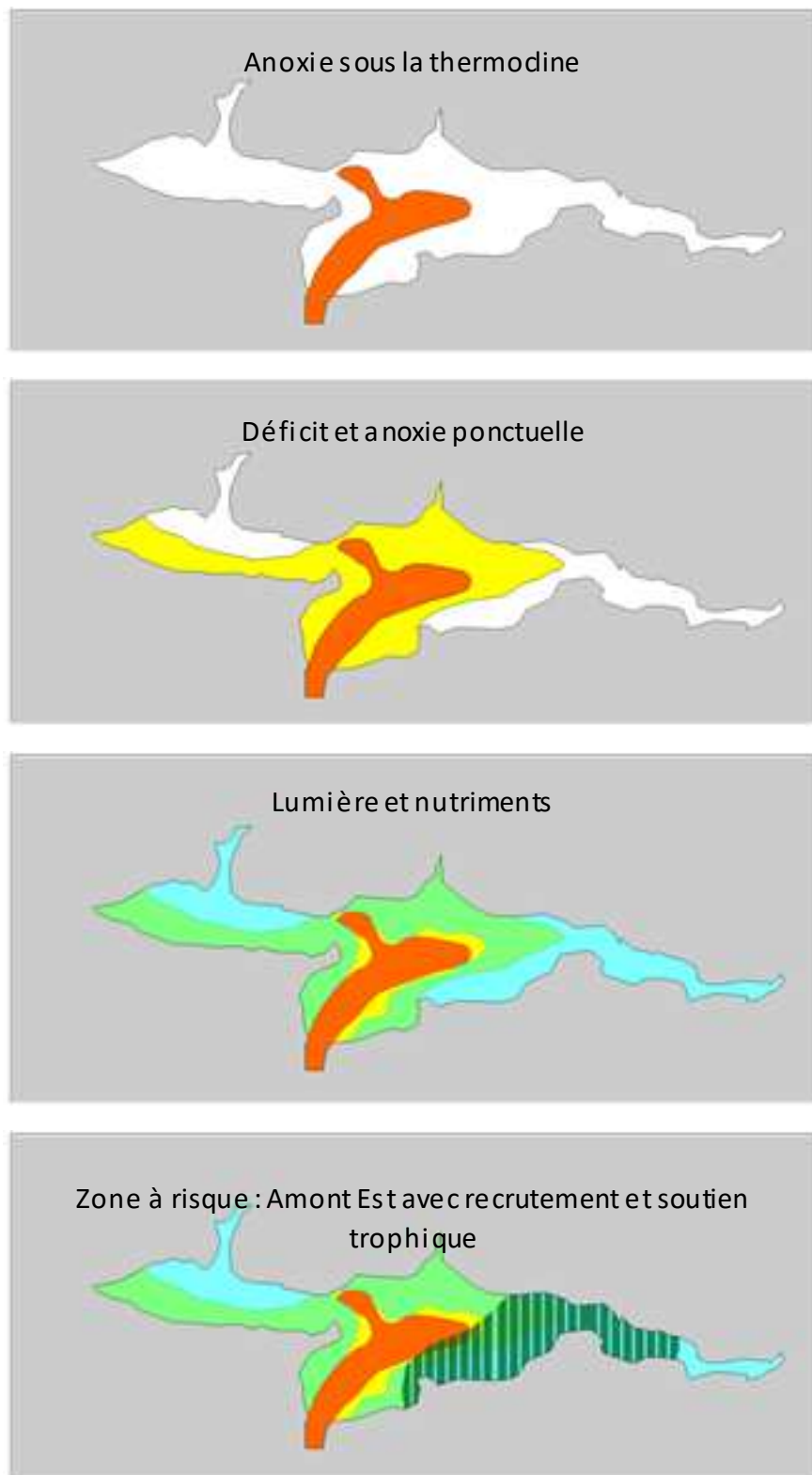


Figure 78 : Les zones de recrutement des cyanobactéries sont repérées par recoupement (lumière et déficit d'oxygène sur le fond). En 2015-16 seul le flanc Est a été observé comme zone d'émergence, le secteur Est peut cependant jouer ponctuellement ce rôle d'incubateur

II.4. Le domaine climatique

Ce groupe de facteurs est défini par les paramètres climatiques locaux (température, pluviométrie, ensoleillement) définissant des aires plus favorables à certains types de cyanobactéries pendant la période de mai à octobre.

On peut noter, en comparaison avec la Bretagne et la Mayenne, que les caractéristiques climatiques du Vioreau (station Météo France de Nort sur Erdre, période de référence 1976-2015, Figure 79) se situent dans les valeurs élevées pour la température (en moyenne 16.2°C) et pour l'ensoleillement (en moyenne 309 kW/m²). Ces valeurs correspondent à des gammes optimales pour la plupart des espèces potentiellement toxiques, notamment pour les *Anabaena* et *Microcystis*.

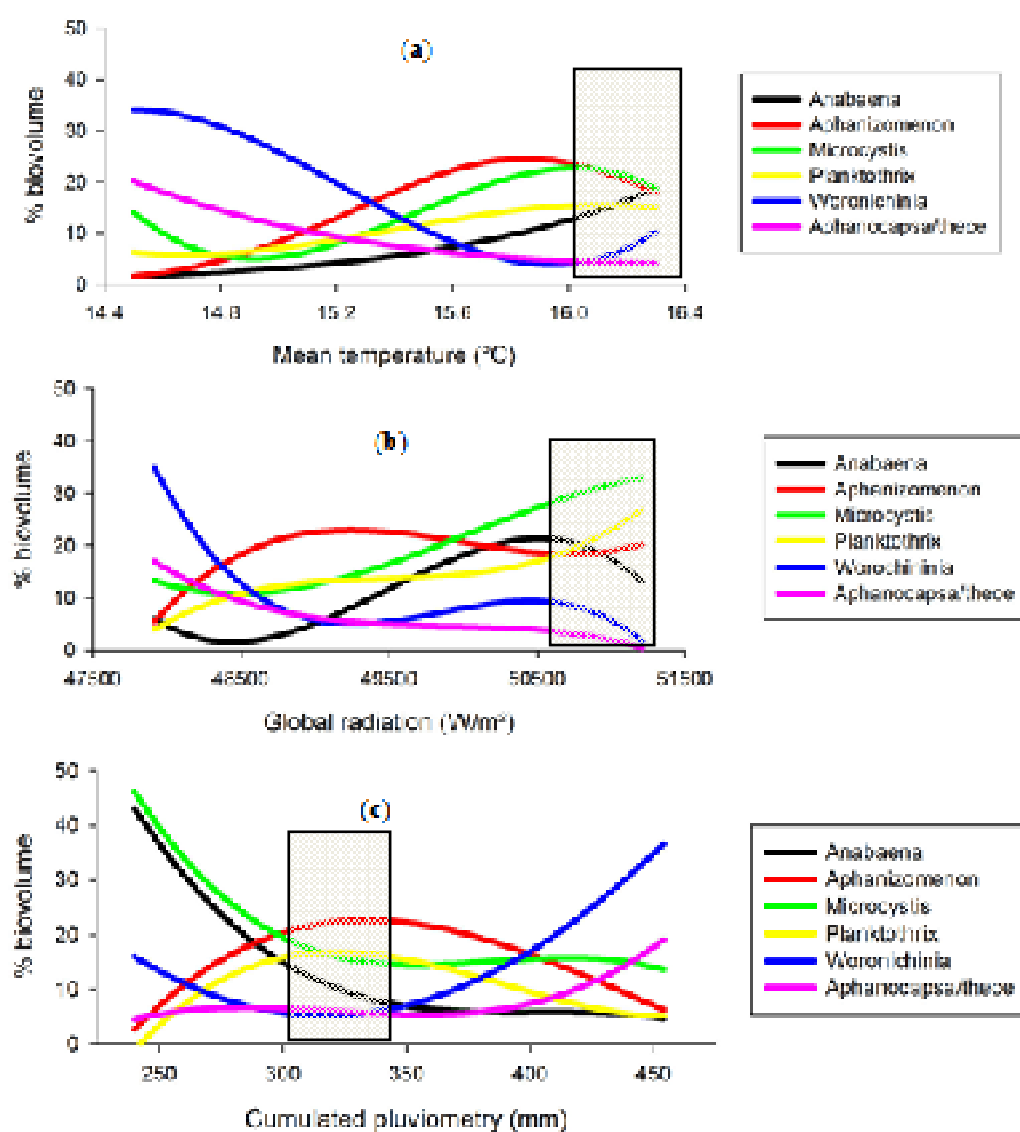
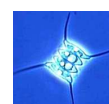


Figure 79 : Distribution des principaux genres de cyanobactéries en fonction de la température moyenne (a), du rayonnement global (b) et de la pluviométrie cumulée (c). Les valeurs correspondant au lac de Vioreau sont représentées par des cadres translucides.



La pluviométrie est, en parallèle, relativement faible avec un cumul moyen de 338 mm. Cette valeur correspond au début du domaine favorable aux espèces déjà citées, *Microcystis* et *Anabaena*. Les pluviométries les plus faibles (inférieures à 300 mm) représentent quant à elles près de 36 % des données disponibles, indiquant que le domaine climatique varie, selon les années, de favorable à très favorable pour les espèces qui ont été suivies au cours des 2 années d'étude, ce qui explique qu'elles dominent aussi fréquemment les suivis historiques.

Enfin, on doit noter que si le Vioreau est situé dans un domaine globalement chaud et ensoleillé favorable aux cyanobactéries toxiques, pour la période mai-octobre les températures et les cumuls de rayonnement restent, depuis les années 2000, en recul sensible par rapport à la décennie précédente, qui constituait le point culminant d'une élévation constante des températures et de l'ensoleillement depuis les années 60.

Ce recul est d'autant plus significatif que dans le même temps les moyennes et cumuls annuels étaient en progression régulières : en 50 ans, les températures moyennes annuelles ont augmenté de 0.7°C, la pluviométrie de 25 % (avec des maxima qui ont quasiment doublé), et le rayonnement global de 5 % par rapport aux moyennes de 1968-1978.

Cette évolution semble traduire des passages de perturbations plus fréquents pendant les mois les plus chauds (juillet et août : Figure 80), et peut contribuer à contenir l'expansion des cyanobactéries. On peut supposer que le problème sera plus sensible si ces 2 paramètres reprennent leur progression vers leurs valeurs des années 90 à 2000.

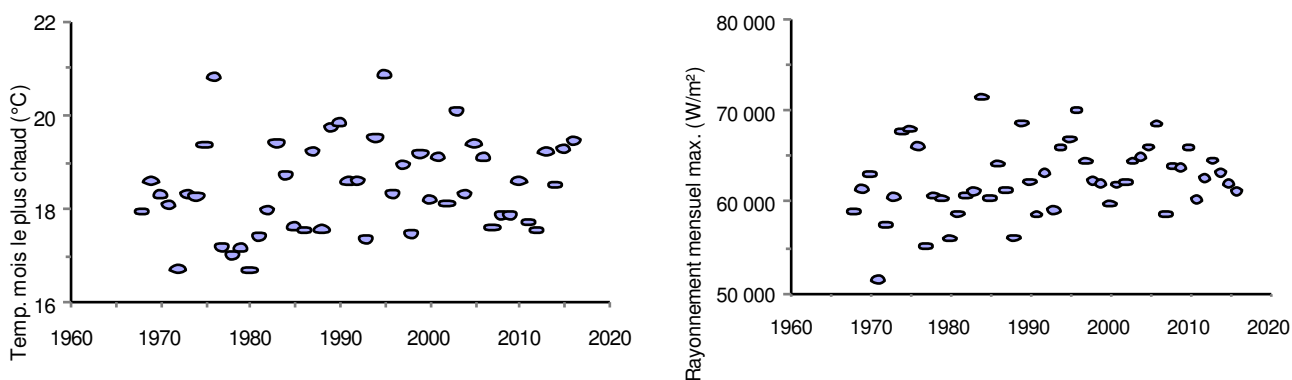
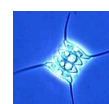
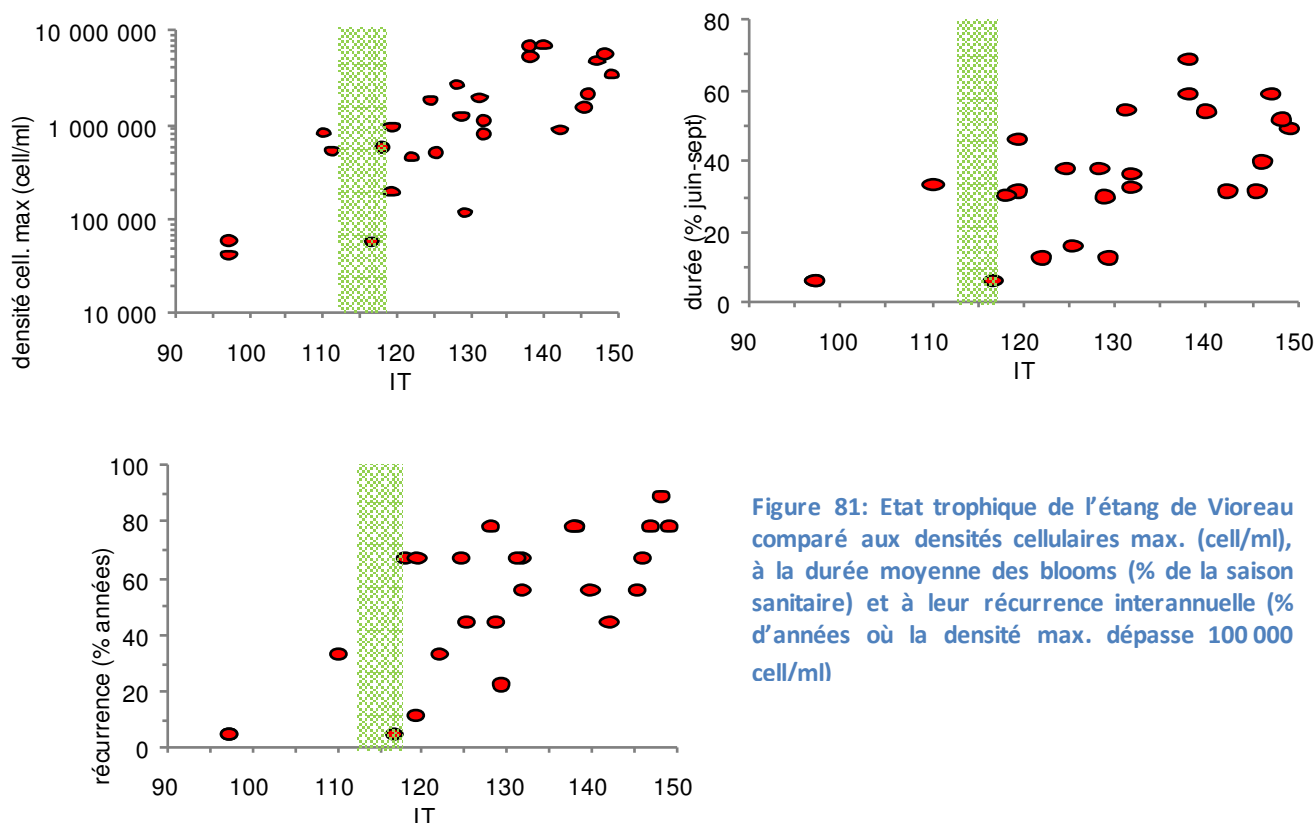


Figure 80 : Evolution des températures moyennes et de l'ensoleillement cumulé pour les mois les plus chauds (90^{ème} centile) depuis 1968 à Nort sur Erdre



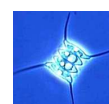
II.5. Statut trophique et nutriments

L'utilisation de l'indice Carlsson, développé pour l'OCDE, décrit le statut trophique du plan d'eau à partir des teneurs en phosphore et en chlorophylle. Il montre notamment que la disponibilité des nutriments, bien qu'élevée, ne figure pas parmi les plus fortes des plans d'eau du grand Ouest, ce qui est a priori en contradiction avec les valeurs de densité et de durée des épisodes de prolifération enregistrés à la plage.



Cet indice est cependant calculé à partir des données de suivi obtenues au point aval du lac (données EDENN, AELB, Interfaces : point V6, Figure 63) et ne rend pas compte de l'évolution de la disponibilité des nutriments au sein du lac, au cours du trajet des cyanobactéries entre les zones d'émergence et les points de suivi.

Les différences entre secteurs du lac peuvent par compte être mises en évidence au travers des mesures de quotas cellulaires, qui représentent la fraction d'azote et de phosphore disponible dans chaque cellule (réserves cellulaires).



Ces quotas ont été calculés au cours des différentes campagnes de terrain et sont représentés page suivante. Pour simplifier leur représentation, le point de référence a été fixé au premier profil suivant le Pont de la Musse, dans la queue de retenue Est du lac, et les quotas sont exprimés en % du contenu cellulaire dans ce point.

En examinant les quotas selon l'axe Est-Ouest, on peut noter que les cellules paraissent se recharger en azote dans les queues de retenue (de V1 vers V2, et de V9 vers V10), au début de leur parcours vers l'aval. Leurs réserves s'érodent ensuite graduellement pour atteindre environ 80 % de leur valeur originale à la confluence des 2 bras, face à la base nautique. Le contenu en phosphore suit une évolution plus simple et plus rapide: il diminue en continu des queues de retenue vers la confluence, où il n'atteint plus que 45 % du stock initial.

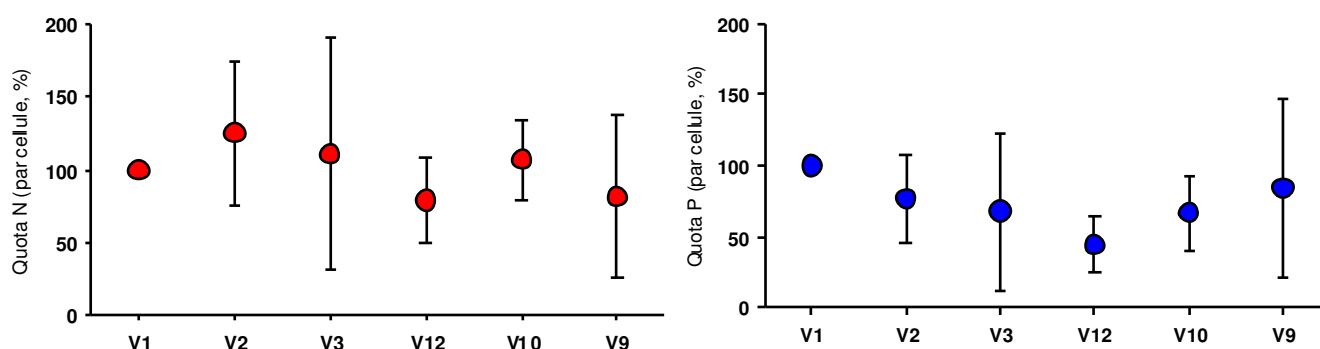


Figure 82 : Evolution des quotas de N et P selon l'axe Est-Ouest

Représentés selon l'axe principal de circulation de la masse d'eau, de l'Est vers la base nautique puis au sud vers le barrage, leur évolution montre un épuisement continu mais plus rapide pour le phosphore que pour l'azote: les stocks cellulaires de N, consolidés dans la queue de retenue pour atteindre 125 % de l'origine, représentent encore 73 % au niveau du barrage (V6), contre 36 % pour le phosphore.

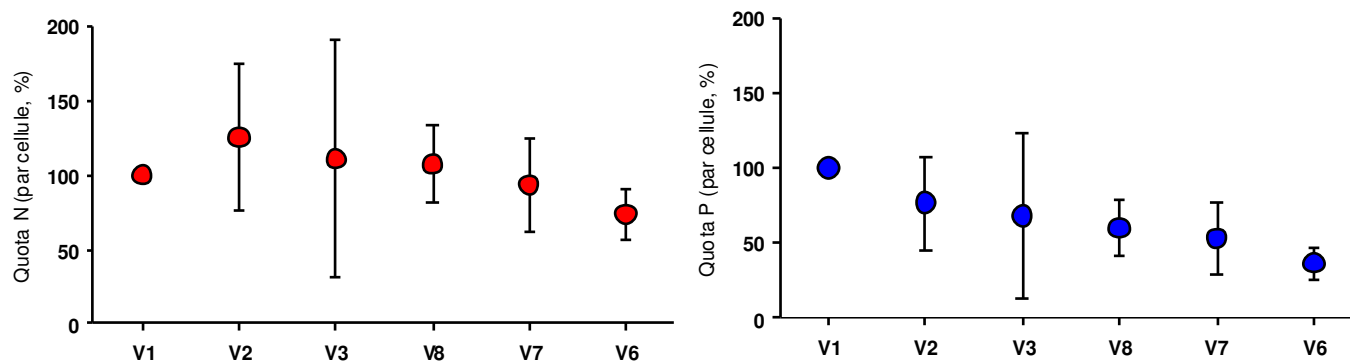
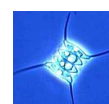


Figure 83 : Evolution des quotas de N et P selon l'axe de circulation principal



On peut en déduire que les cyanobactéries, qui ont constitué des réserves de nutriments en amont, arrivent dans le secteur aval en état de carence cellulaire. Il est donc nécessaire qu'elles puissent reconstituer leurs réserves, et toute source de phosphore va donc s'avérer critique pour la suite de leur développement.

II.6. Morphologie lacustre

Les plans d'eau peu profonds présentent des conditions plus favorables aux fortes densités cellulaires, notamment grâce à un réchauffement plus rapide des eaux dans les zones de haut fonds, ce qui facilite le recrutement des cyanobactéries en début de saison. Le Vioreau, avec une profondeur maximale de 6 mètres, se situe dans la gamme intermédiaire, celle des plans d'eau hébergeant habituellement des densités maximales de 200 000 à 2 000 000 cell/m.

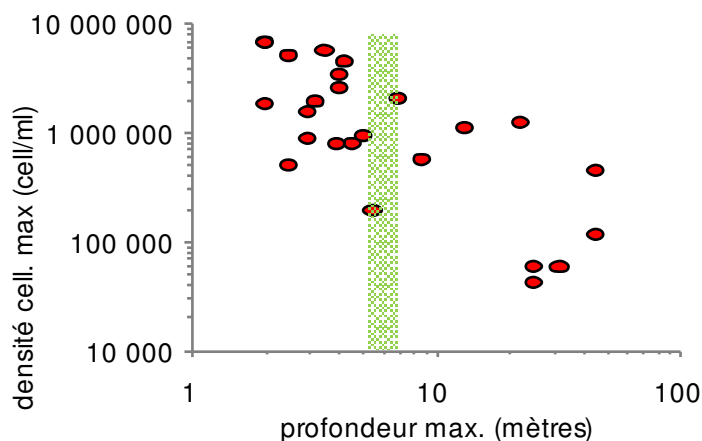


Figure 84 : Densités cyanobactériennes (cell./ml) maximales en fonction de la profondeur maximale (mètres) des plans d'eau (source : Limno sarl - LERES/EHESP)

L'influence du bassin versant dépend du volume du lac relativement à la surface de son bassin d'alimentation. Selon les données régionales du projet Oracle, plus cet indice augmente, et plus les risques quant à la densité cellulaire diminuent. Le Vioreau se situe, là aussi, dans la gamme des plans d'eau à risque, avec une gamme de densité cellulaire maximale pouvant atteindre 100 000 à 1 000 000 cell/ml.

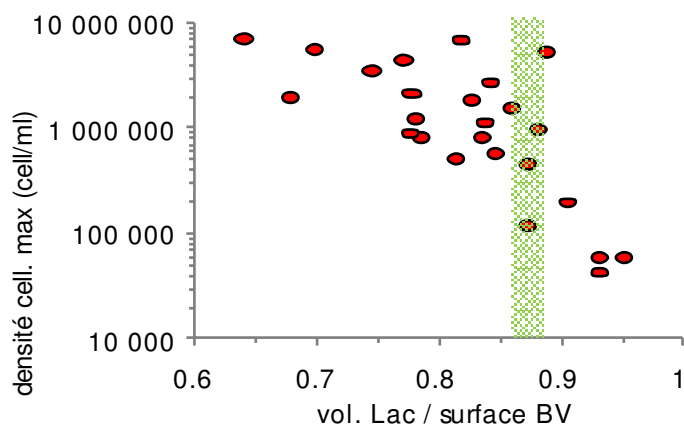
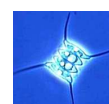


Figure 85 : Densités cyanobactériennes (cell./ml) maximales en fonction du rapport de taille entre le lac et son bassin versant (source : Limno sarl - LERES/EHESP)



On peut en déduire que la taille du bassin-versant, relativement faible par rapport au volume du lac, agit comme un facteur aggravant de la profondeur, au travers par exemple d'un faible renouvellement des eaux conjugué à un réchauffement rapide au printemps.

Le renouvellement des eaux est un facteur qui est apparu important au cours de l'étude Oracle (ANSES 11-115, 2011-2014). Les paramètres décrivant les risques associés aux cyanobactéries (concentrations des cellules et des toxines, fréquence des blooms...) ont en effet pu être situés autour d'une série de courbes en cloche conditionnées par le taux de renouvellement des eaux des lacs exprimé en moyenne sur 10 ans.

Au vu de la taille réduite de son bassin versant actuel, le lac de Vioreau se situe dans la gamme des renouvellements favorisant les fortes concentrations de microcystines (figure suivante), ce qui est cohérent avec les observations disponibles (Vioreau : microcystines détectées dans 33 % des échantillons analysés contre 7 % des échantillons en Bretagne et Mayenne).

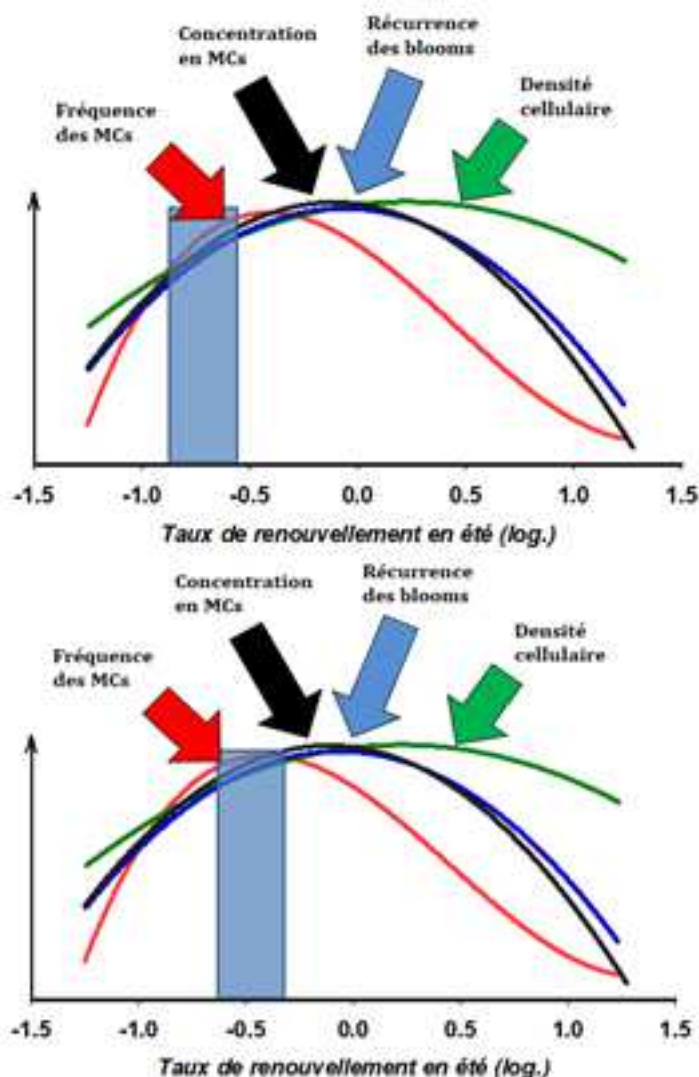
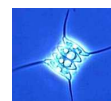


Figure 86 : Positionnement du Vioreau vis-à-vis des cyanobactéries et des toxines pour son bassin versant actuel (en haut) ou pour son bassin complet (en bas)



Avec son bassin versant théorique complet (c.à.d. incluant celui de la Provostière), le renouvellement augmente mais reste insuffisant pour atténuer le problème (Figure 86). Au contraire, la fréquence de détections des microcystines tend à diminuer au profit d'une augmentation de la densité cellulaire et de la durée de présence des cyanobactéries dans la masse d'eau.

Compte-tenu des débits apparemment disponibles sur l'ensemble du bassin d'alimentation, une réduction des cyanobactéries par gestion hydraulique des temps de séjour paraît difficilement réalisable, puisqu'il faudrait réduire le volume du lac à un niveau incompatible avec sa vocation de soutien d'étiage et d'alimentation du canal.

II.7. Le régime des vents

Indépendamment de la charge en phosphore et de la morphologie du lac, le régime des vents a été identifié comme l'un des paramètres aggravants vis-à-vis des cyanobactéries.

Tout d'abord, compte-tenu de l'orientation et de la forme de la plage (où sont suivies les cyanobactéries dans le cadre du contrôle sanitaire des baignades), face au Sud-Ouest, les vents provenant d'un secteur 140 à 230° N (Figure 87) auront tendance à repousser les cyanobactéries flottantes (potentiellement toxiques) vers la zone de baignade.

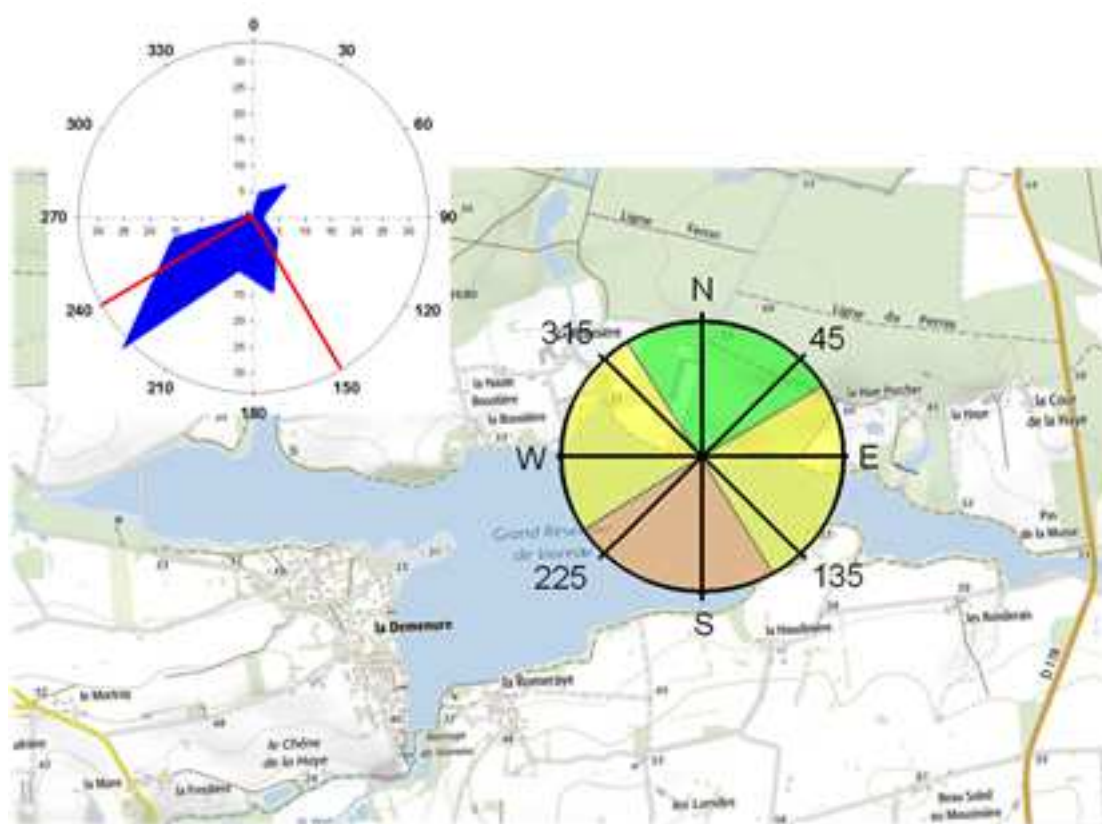


Figure 87 : Orientation de la plage et vents dominants enregistrés à la station de Nort-sur-Erdre

Les vents dominants (mesurés à Nort-sur-Erdre) pendant la période mai-octobre, de 1981 à 2015, sont justement en majorité de Sud-Ouest, et épisodiquement d'Ouest ou de Sud-Est.

On peut noter également que le régime des vents évolue pendant la période estivale : les vents d'Ouest sont majoritaires en début d'été (juin à août) mais avec une fréquence diminuant jusqu'en septembre. Les vents de Sud-Ouest tendent au contraire à augmenter à partir de juin, pour devenir dominants en août (période de plus forte fréquentation) et septembre.

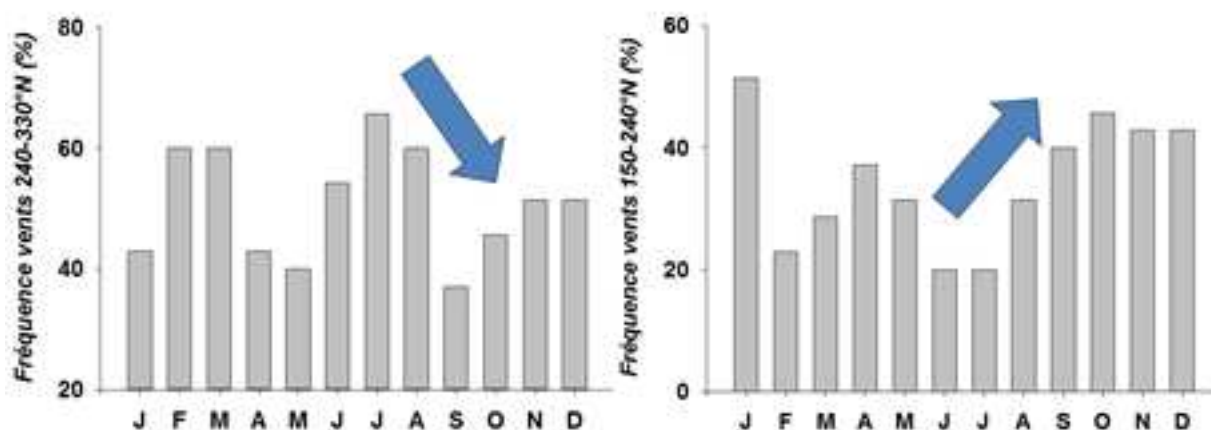


Figure 88 : Evolution saisonnière du régime dominant des vents à Nort-sur-Erdre

Enfin, un net basculement des dominances est observable sur le long terme : les vents dominants étaient ainsi exclusivement d'Ouest au cours des années 1995 à 2005 (entre 240 et 300°N), et sont majoritairement de Sud-Ouest depuis une dizaine d'années (Figure 89).

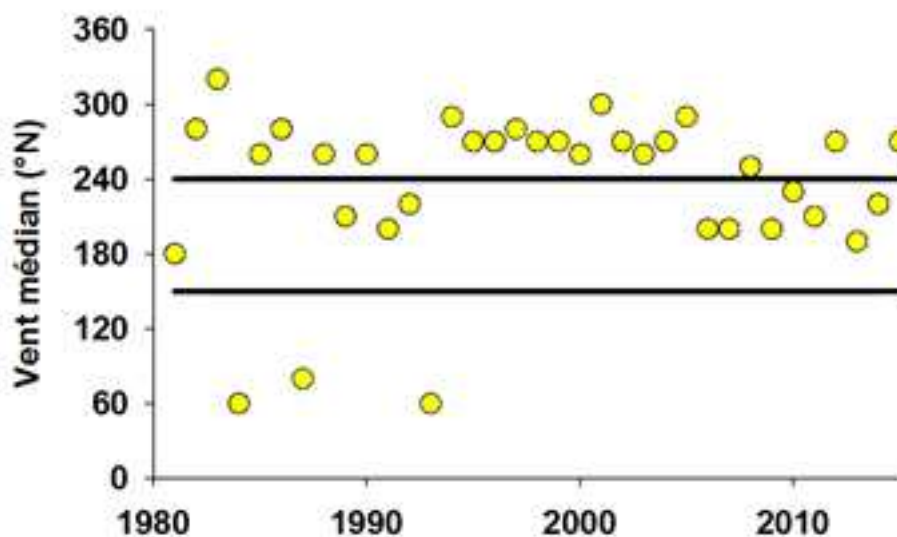
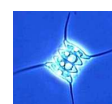


Figure 89 : Evolution des vents dominants à Nort-sur-Erdre sur la période 1980-2016



Globalement, en raison des déplacements de cyanobactéries sous l'action du vent, ces trois paramètres (orientation de la plage, évolution saisonnière des vents et basculement à long terme des vents dominants) contribuent à amplifier les risques d'exposition aux cyanobactéries en augmentant la fréquence, la durée et l'intensité des dépassements des seuils OMS.

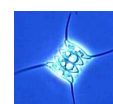
Le régime des vents peut également contribuer à l'alimentation de la flore en nutriments grâce aux épisodes de déstratification.

Nous avons vu au II.3 et II.3.5 que l'une des clés du développement des cyanobactéries est la disponibilité du phosphore, dès les phases initiales d'émergence au printemps. Au cours de l'été, une fraction importante du phosphore est présente, sous forme dissoute et assimilable, dans les eaux profondes en anoxie, sous la thermocline.

Cette partie du phosphore est en temps normal inaccessible aux cyanobactéries, qui tendent à se développer dans la zone euphotique, à 1 ou 2 mètres sous la surface. Pourtant, sous vent fort, il est possible que la masse d'eau du lac soit déstratifiée et mélangée, ce qui permet d'apporter du phosphore assimilable dans les eaux de surface et réalimenter la flore.

Pour tester cette hypothèse, des sondes thermiques ont été placées en surface et sur le fond du lac, à la base nautique et au pied du barrage, et les températures ont été enregistrées en continu toutes les 10 minutes du 12/08 au 12/10/2016.

Les résultats montrent que le lac a connu, d'août à septembre, entre 1 et 3 épisodes de déstratification par semaine, et que ces épisodes pouvaient durer de 4 à 48 heures. On peut donc en déduire que pendant leur période de croissance estivale les cyanobactéries ont accès plusieurs fois par semaine aux ressources trophiques accumulées dans les eaux profondes, et que les nutriments et autres éléments dissous des eaux profondes (phosphore, fer, soufre, ammoniac...) viennent s'ajouter aux nutriments disponibles dans la lame d'eau superficielle.



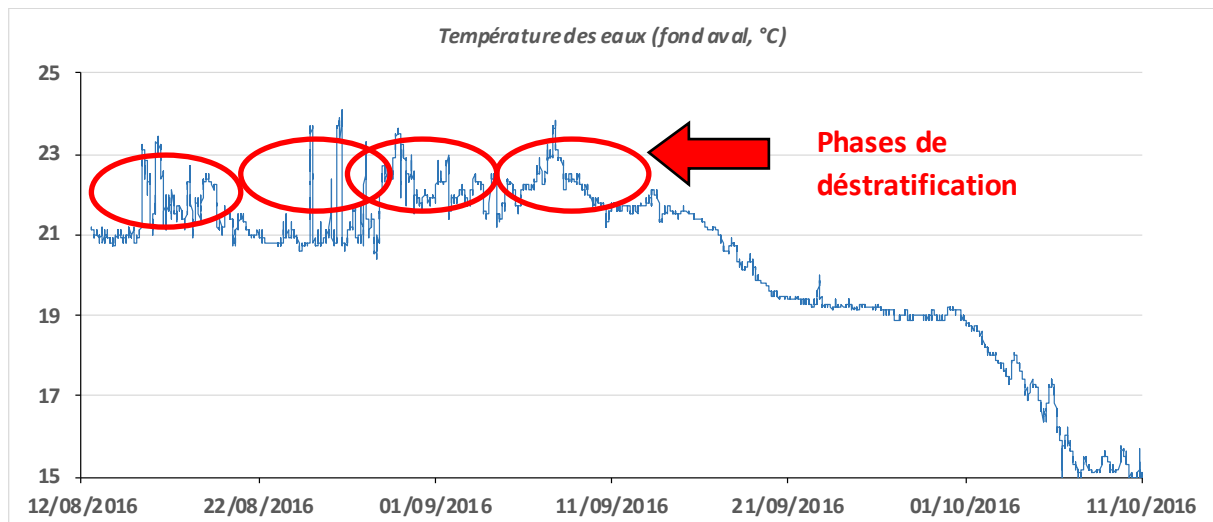
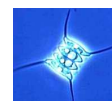


Figure 90 : Evolution de la température des eaux au fond du lac, au pied du barrage



II.8. Caractérisation des sédiments

Afin de mettre en évidence le rôle de la charge interne en phosphore du plan d'eau sur l'enrichissement de la colonne d'eau, un échantillonnage de sédiment superficiel (0 à 30 cm) a été réalisé sur 8 stations, réparties en fonction des données recueillies et résultats produits au cours de la première année d'étude.

Les zones d'émergence des blooms ont été privilégiées, suite aux résultats des profils en long du développement des cyanobactéries sur le lac.

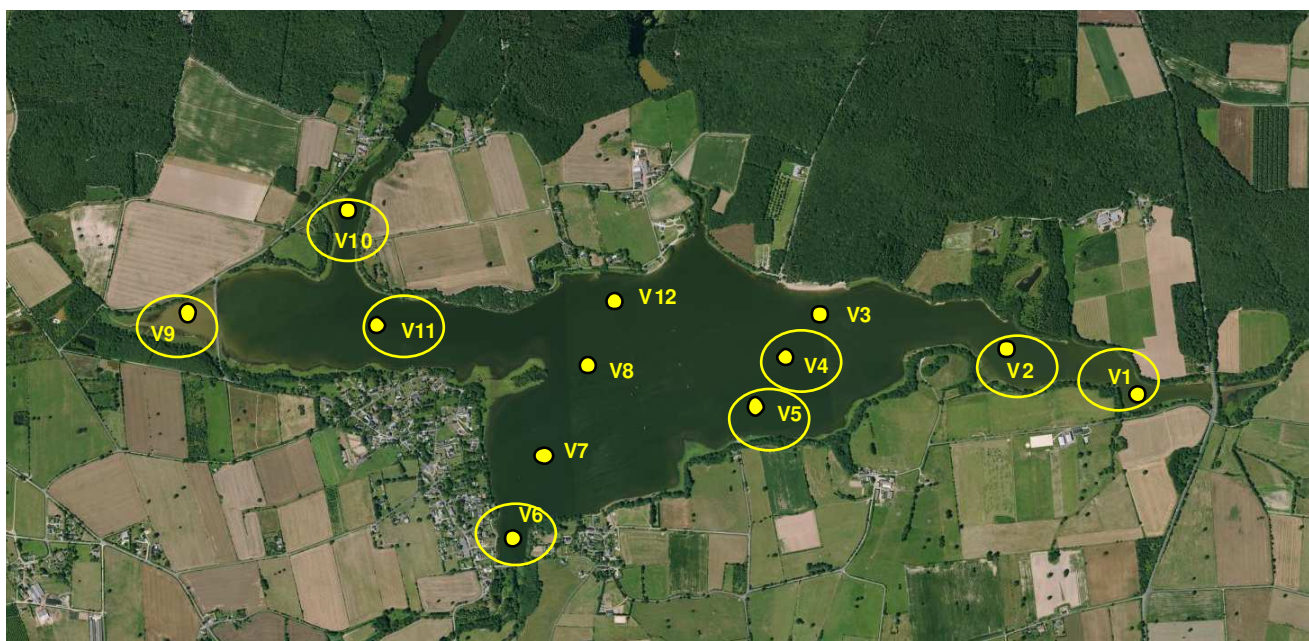


Figure 91 : Station de prélèvement des sédiments du lac de Vioreau

Des échantillons moyens ont donc été réalisés à l'aide d'une benne Van Veen.

Les stations V1, V2, V4, V5 représentent le secteur Est du plan d'eau, avec une zone d'émergence principale.

Les queues d'étang protégées, à l'ouest (V9) et à l'aval de Petit Vioreau (V10) assurent également des conditions optimales (mais rapidement hors d'eau).

La station V11 devient une zone potentiellement active (peu profonde) à partir du mois d'août.

La qualité du secteur aval (V7) est également appréciée à titre de comparaison.

La teneur en phosphore dans ces 8 échantillons a été réalisée par minéralisation complète du sédiment (totalité des formes de Phosphore).

Les valeurs sont comprises entre 0,86 et 1,87 μg de phosphore par mg de sol sec, c'est-à-dire significativement au-dessus des teneurs attendues sur les sols arables du bassin versant (compris entre 0,5 et 0,7 $\mu\text{g}/\text{mg}$).

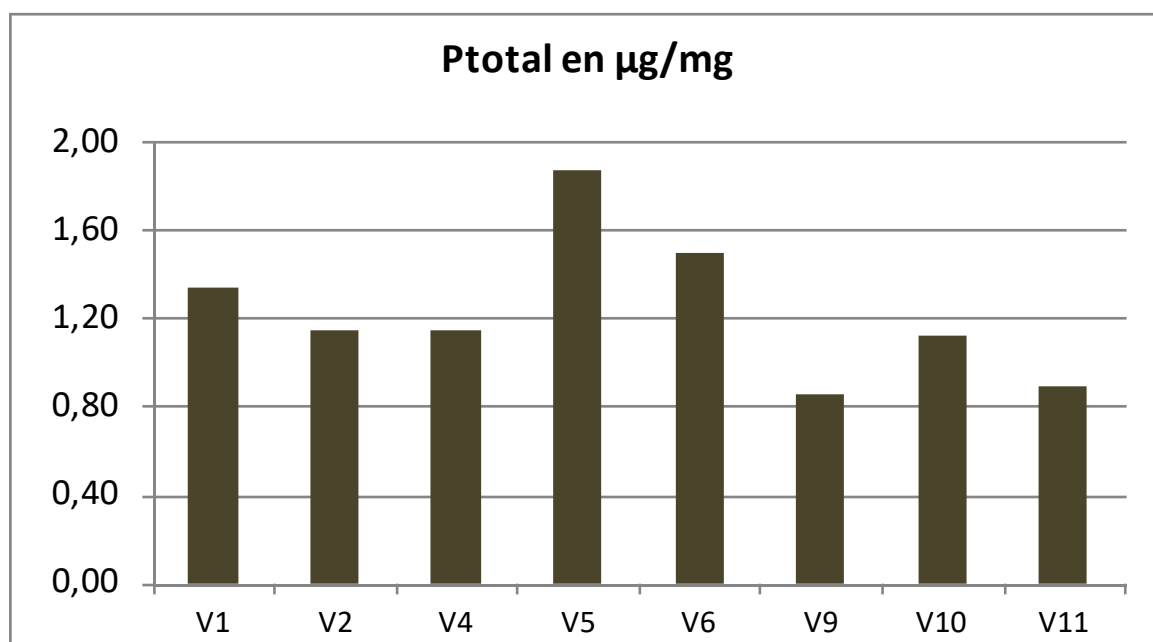


Figure 92 : Teneur en phosphore (total) dans les sédiments de Vioreau

Les concentrations les plus importantes sont mesurées sur l'entrée Est, et surtout au milieu du lac (V5) et sur la partie aval (V6).

Cet enrichissement qui est lié à l'historique des apports en phosphore (dissous et particulaire) ne suffit pas pour qualifier le poids du sédiment sur la dynamique du phosphore dans la colonne d'eau.

La concentration d'équilibre des ortho-phosphates, sous condition standard, est l'EPC₀.

Elle permet de comparer différents sédiments dans une même solution aqueuse (ici CaCl_2 $5 \cdot 10^{-4}$ M), avec un temps de contact défini (2 heures).

L'EPCo modifie la première distribution (ci-dessus) en soulignant les secteurs pour les quels les échanges sont potentiellement plus importants, vers la colonne d'eau.

Plus la valeur d'EPCo est forte et plus le sédiment échange vers la colonne d'eau pour maintenir une concentration en PO₄ élevée (indépendamment des conditions red/ox).

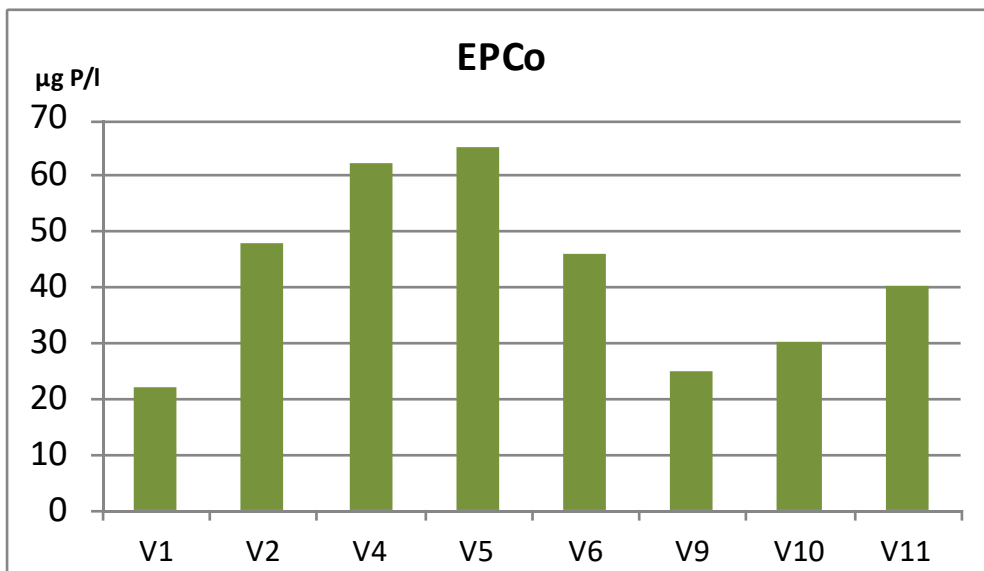
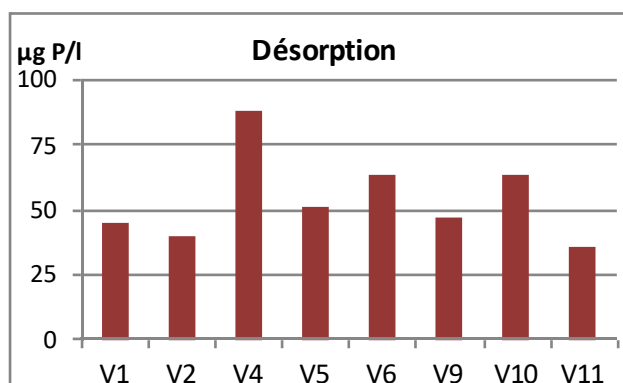


Figure 93 : Valeur d'EPCo des sédiments de Vioreau

Les secteurs V2 à V5 sont ainsi ceux qui ont les sédiments qui participeraient le plus aux échanges à l'interface sédiments/eau.

Ce résultat peut aussi expliquer pourquoi les concentrations sont les plus fortes en V1, qui aura plus tendance à s'enrichir, avec une capacité de relargage moins importante.

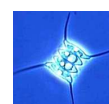
Les valeurs d'EPCo sont donc les plus importantes sur la queue d'étang Est, secteur du ruisseau du Pas Chevreuil, qui est également celui soumis aux conditions de la pêche à la carpe (amorces).



Le relargage de PO₄ dans une solution dépourvue de phosphore (ci-contre) souligne la difficulté du sédiment V4 à retenir ce phosphore labile.

Il ya une spécificité en V4.

Figure 94 : Désorption du sédiment de Vioreau, après 2 Heures dans une solution dépourvue de phosphore



Nous avons ici un résultat qui est concomitant avec celui du déplacement des blooms de cyanobactéries.

C'est dans cette même zone Est (soumise aux apports du bassin versant du Pas Chevreuil et anciennement de la rigole des Ajots) que les capacités de maintien d'une concentration faible du phosphore dans la colonne d'eau, par le sédiments sont les plus faibles. C'est-à-dire que la concentration d'équilibre est la plus élevée. Le sédiment seul peut donc influencer significativement les flux de phosphore vers la colonne d'eau, surtout si un autre processus vient pomper ce phosphore bio-disponible (par exemple un bloom) dans la colonne d'eau. Le sédiment aura alors tendance à rétablir la concentration d'équilibre en réinjectant des ortho-phosphates vers la colonne d'eau. Il pourrait ainsi alimenter le bloom au fur et à mesure de son développement.

Nous sommes ici dans des hauteurs d'eau peu importantes (0,5 à 3 m) au niveau des queues d'étangs Est et Ouest. Les relargages et stockages peuvent se faire indépendamment des conditions d'oxygénation des fonds.

Une dernière caractérisation a été menée sous atmosphère inerte (Azote N_2) afin de quantifier le phosphore qui est potentiellement disponible pour la colonne d'eau sous condition anoxique (sans oxygène). Le phosphore labile (adsorbé) et le phosphore intégré dans les formes amorphes du fer et de l'aluminium de la matrice du sédiment sont relargués par dilution des formes réduites et quantifiés dans la colonne d'eau. Après 96 Heures, le relargage est terminé, et la mesure du phosphore exporté vers la colonne d'eau est faite.

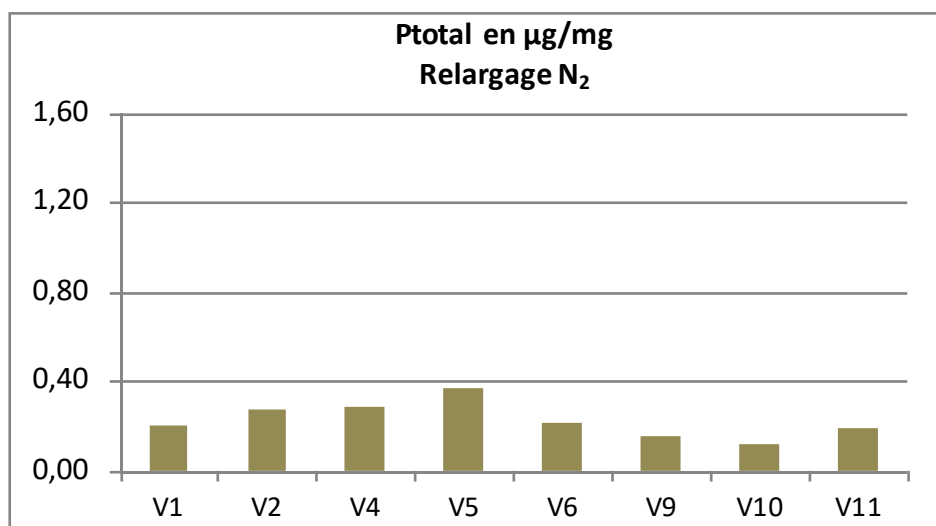
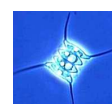


Figure 95 : Relargage sous conditions anoxiques des sédiments de Vioreau (96H)

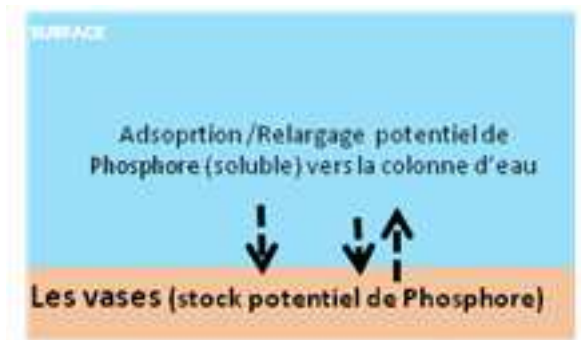
Cette quantité est ensuite rapportée à la quantité totale présente dans le sédiment (en poids sec).



Sous conditions anoxiques totales (et permanentes sur 96 H) c'est le sédiment V5 qui aura la plus importante charge de phosphore bio-disponible pour la colonne d'eau.

Cette approche est trop éloignée des conditions réelles pour en tirer des conclusions définitives. La vision est complémentaire à la désorption (EPCo). Elle tendrait à mettre en évidence que lors des phases de désoxygénation (des fonds), des formes complémentaires d'ortho-phosphates pourraient être mises à disposition d'un nouveau bloom, plus intensément sur le secteur médian du lac (V5).

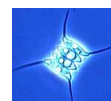
Cette série de caractérisations au laboratoire de la dynamique du phosphore du sédiment de Vioreau confirme que la charge interne du Lac n'est pas un simple stockage de matériaux et de phosphore, mais bien un compartiment qui participe à l'évolution de la qualité physicochimique de la colonne d'eau ; et réciproquement.



L'enrichissement dans le temps en phosphore du sédiment est notable (près de 2‰ maximum) et plus important sur la queue d'étang Est.

C'est aussi dans ce secteur (V4) que les capacités de rétention du phosphore par le sédiment sont les moins importantes (les valeurs d'EPCo les plus élevées).

CONCLUSIONS du DIAGNOSTIC



Le Lac de VIOREAU se différencie des nombreux lacs et réservoirs que nous avons pu étudier ces 15 dernières années sur le Grand Ouest par une pression anthropique moins forte à l'échelle de son bassin versant (une importante surface boisée, un risque d'érosion faible des parcelles agricoles). Ceci se traduit par des apports de flux de nutriments moins importants.

La station d'épuration de la Meilleraye produit le seul rejet d'effluent traité, et l'assainissement autonome dispersé n'est pas dense ni localisé près du réseau hydrographique. Les zones d'érosion potentielles ont été localisées précisément, mais l'absence de pluies à la période des sols peu couverts (octobre / janvier) a empêché de valider ce risque sur chacune de ces zones, qui restent peu nombreuses comparés à d'autres bassins versants agricoles.

Des actions de sensibilisation et de communication pourront donc maintenir ce « faible » degré d'impact des bassins versants qui alimentent Vioreau. Aucune action curative, ni préventive supplémentaire n'est aujourd'hui nécessaire.

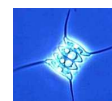
Il est alors possible de travailler sur le plan d'eau lui-même, sans risque de voir effacer en une ou deux saisons ces actions intra Lac, par des apports non contrôlés de nutriments depuis les versants.

A partir des données disponibles et des 2 campagnes estivales 2015 et 2016, un premier comportement hydrobiologique du Lac se dégage dans un contexte sec.

La zone d'émergence principale du bloom se situe au niveau de l'anse Est (aval du pont de la Musse). Les eaux y sont peu profondes et l'anse est encore liée avec les apports amont. Cependant sur les 2 années, les apports étaient particulièrement faibles car les débits n'ont pas été soutenus dès le mois de juin.

Le rôle de la charge interne du Lac devient alors prépondérant. Le dimensionnement de solutions à la mesure du problème nous a conduit à préciser les volumes de vases en jeu au niveau de cette anse, jusqu'à la plage.

Le curage n'est proposé que lorsque le contrôle des flux particuliers (érosion) amont est assuré. C'est en partie le cas sur le bassin du Pas Chevreuil qui se jette dans l'anse Est pour alimenter Vioreau. Il serait en effet difficile de réduire encore significativement ces flux de particules, et donc de phosphore, dans un contexte agricole.



Le curage est donc envisageable, pas sur l'ensemble de Vioreau, ce qui serait économiquement rédhibitoire, mais sur un secteur ciblé.

La zone d'émergence étant en partie alimentée en phosphore par le sédiment en place, il faudra rechercher à retirer le stock de phosphore disponible dans ce secteur en priorité, et également retrouver de la hauteur d'eau.

Cette solution devra s'accompagner de mesures complémentaires pour ne pas poursuivre l'enrichissement de cette anse, à proximité de la plage.

C'est bien l'enjeu récréatif, baignade, activités nautique et pêche qui est ici visé. Il n'est pas possible de supprimer toute apparition de cyanobactéries dans ces eaux douces, mais juste de les cantonner sur des périodes hors activités récréatives.

Aujourd'hui l'anse Est propose toutes les conditions pour un développement précoce des cyanobactéries dès le printemps (eaux peu profondes, en contact avec une source de phosphore, ensoleillement optimal et réchauffement rapide...). Il conviendra donc de chercher à modifier (perturber) ces conditions.

L'hydraulique est également un point prépondérant dans la gestion de Vioreau, réservoir artificiel initialement dédié à l'alimentation du canal de Nantes à Brest. Il sera donc nécessaire de tenir compte des besoins premiers du site, à savoir un remplissage en eau maximum pour le début de la saison d'exploitation.

L'étude des phénomènes hydrobiologiques de cette masse d'eau repose principalement sur les 2 années d'investigations 2015 et 2016. Les données des suivis routines ne sont pas dimensionnées pour compléter le diagnostic à l'échelle du Lac. Des incertitudes existent donc sur la réaction du Lac après des vrais hivers humides, et également sous conditions estivales moins clémentes.

Cette approche multicritère a également insisté sur le poids des conditions météorologiques locales lors de l'émergence et du transport d'un bloom des zones d'incubation à la plage. Un équipement permanent du site permettant la définition d'une chronologie continue des variations de hauteurs d'eau, des températures de cette masse d'eau et des conditions météorologiques locales (en particulier le vent) serait un atout supplémentaire pour améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrobiologique de ce Lac. La présence de la base nautique donnerait d'ailleurs de la cohérence à l'utilisation de cette station d'observation qui deviendrait également un outil de gestion des activités nautiques.

