

Mémoire

Auteur : Demorcy, Gaspard

Promoteur(s) : Brouyère, Serge

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18460>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

ENS – Département des Géosciences – Laboratoire de Géologie UMR 8538

Les réserves de substitutions, une solution à la pression agricole sur la ressource en eau ? Observation et affinement des connaissances sur le bassin des Autizes dans le contexte de la gestion quantitative de l'eau au Sud-Vendée.

GASPARD DEMORCY

**MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, A FINALITE SPÉCIALISÉE**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE SERGE BROUYÈRE

COMITÉ DE LECTURE :

JOOST WELLENS

PHILIPPE ORBAN

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et du département des Géosciences de l'ENS Paris.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et du département des Géosciences de l'ENS Paris.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : DEMORCY Gaspard
gasparddemorcy@collectifs.net

« Le problème c'est un projet de société. Stockage d'eau, oui, mais pour faire quoi ? Au bénéfice de qui ? Pour exporter quelles marchandises ? Pour mettre en concurrence quelle agriculture dans le monde ? Ce n'est pas pour la souveraineté alimentaire, la souveraineté on l'avait, on l'a perdu. Et ce n'est pas le manque d'irrigation qui a fait perdre notre souveraineté, c'est la libre circulation des biens, des hommes, des marchandises et des capitaux. Ça n'a rien à voir avec l'irrigation. (...) Les éleveurs qui arrêtent ça n'a rien à voir avec l'irrigation. C'est le modèle économique qui tue les paysans. Ce n'est pas la question des bassines. Qu'on irrigue où qu'on n'irrigue pas, les gars ils passent à la moulinette tous pareil, avec la théorie de Ricardo des coûts comparatifs. C'est ça qui a tué les paysans. (...) Si on reprenait la valeur ajoutée qui est captée par l'agro-alimentaire et tous les intermédiaires, je n'avais pas besoin de 120 vaches laitières sur mon exploitation. J'en avais besoin de 30. Et si j'en avais eu 30, je n'aurais pas besoin de ça [enrouleur]. Ça j'en ai besoin parce que quand y a des années plus sèches on ne passe pas le cap. On n'a pas assez de nourriture. Mais on n'a pas assez de nourriture parce qu'on a augmenté notre productivité, on a augmenté les animaux. Au bénéfice de qui ? Pas au bénéfice des paysans. (...) »

(Philippe Grégoire, 26 mars 2023¹)

¹ Philippe Grégoire – Philippe est dans le pré. (2023, 26 mars). *Les retraites les bassines et les libertarés* [Vidéo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=rbCUvdl_DEs

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	10
I - Genèse d'une problématique dans le Marais poitevin	13
I - 1. De la formation à l'aménagement du marais	13
I - 2. Agriculture	15
I - 3. Drainage et irrigation	15
I - 4. Déficits	17
I - 5. Institution de gestion de l'eau	17
I - 6. Contentieux européen	19
II - Contexte du secteur des Autizes	20
II - 1. Météorologie	20
II - 2. Géologie de la plaine du Sud-Vendée	22
II - 2.1. Le Secondaire	22
II - 2.2. Le tertiaire et le quaternaire	23
II - 3. Contexte hydrogéologique général	24
II - 4. Hydrogéologie du secteur des Autizes	25
II - 4.1. Stratigraphie	25
II - 4.2. Entités affleurantes et failles	25
II - 4.4. Hydrodynamique	28
II - 4.5. Piézométrie	29
II - 5. Hydrologie	33
II - 5.1. Stations de débit.....	33
II - 6. Qualité et faciès hydrochimiques des eaux souterraines et de surfaces	35
II - 7. Occupation du sol	37
II - 7.1. Pédologie.....	37
II - 7.2. Agriculture	38
II - 7.3. Irrigation.....	38
II - 8. Relation eaux souterraines et eaux de surfaces	39
II - 8.1. Situation générale	39
II - 8.2. Contexte des Autizes	40
II - 8.3. Apports des nappes au Marais	42
II - 8.4. Eaux de surfaces et piézométrie	45
II - 8.5. Réseau ONDE.....	47
II - 8.6. Synthèse des éléments clés.....	48
III - Gestion et substitution des prélèvements agricoles.....	49
III - 1. Historique	49
III - 2. Volume autorisé	51
III - 3. Volume prélevé sur les Autizes	51
III - 3.1. Evolution des volumes prélevés.....	51
III - 3.2. Répartition des volumes prélevés	52
III - 4. Réserves de substitution	53
III - 4.1. Contexte	53

III - 4.2. Description des ouvrages.....	54
III - 4.3. Gestion	55
III - 4.4. Impact quantitatif	56
III - 4.5. Etudes d'impacts	57
III - 4.6. Effets observés.....	58
III - 5. Evolution des volumes et de la dynamique de remplissage et de vidange des réserves de substitutions.....	61
III - 5.1. Volume mensuel.....	61
III - 5.2. Volume journalier	62
III - 5.3. Evolution du nombre de jour sous les seuils de remplissage	63
III - 5.4. Synthèse des éléments clés.....	64
IV - Modélisation de l'évolution des besoins en eau agricoles	65
IV - 1. Contexte	65
IV - 2. Evolutions prévisibles et état de l'art	66
IV - 2.1. Perspectives générales.....	66
IV - 2.2. Confort hydrique et demande en eau	66
IV - 2.3. Cultures.....	67
IV - 3. Matériel et méthode	67
IV - 3.1. Modèle AquaCrop	67
IV - 3.2. Projections climatiques	68
IV - 3.3. Typologies des sols et réserves utiles	69
IV - 3.4. Typologie des cultures	70
IV - 4. Résultats et discussion	71
IV - 4.1. Rendement	71
IV - 4.2. Humidité du sol	71
IV - 4.3. Besoin net en eau	72
IV - 4.4. Ressource en eau	74
IV - 5. Limites.....	75
Conclusion.....	77
Références :	79
Annexes.....	83
1. Diagraphies par imageries au site H+ de Poitiers	83
2. Perte dans le lit de la Smagne.....	84
3. Estimations des volumes prélevables	85
4. Protocole de gestion des Autizes (2016).....	89
5. Détails techniques des réserves de substitution	91
6. Etudes d'impact BRGM (2010).....	92
7. Qualité des eaux au sein des réserves de substitution	94
8. Description détaillée des profils de sols utilisés dans AquaCrop	99

Liste des abréviations

CACG : Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne
EPMP : Etablissement public du Marais poitevin
ETM : Evapotranspiration maximale
ETP : Evapotranspiration potentielle
ETR : Evapotranspiration réelle
ONDE : Observatoire nationale des étiages
NGF : Nivellement général de la France
SAGE : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SAU : Surface agricole utile
SDAGE : Schéma directeur aménagement et de gestion des eaux
SNMP : Sèvre-Niortaise Marais poitevin
UG : Unité de gestion

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Débit caractéristique d'étiage et de crue de l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges</i>	34
<i>Tableau 2: Qualité des masses d'eaux souterraines du bassin Loire-Bretagne</i>	37
<i>Tableau 3: Evolution des assolements et surfaces irriguées sur le secteur de l'EPCI Vendée, Sèvre, Autize</i>	39
<i>Tableau 4: Occurrence d'assec ou d'absence d'écoulement visible observé à minima une fois par mois aux points d'observations du réseau Ondes sur les Autizes : nombre d'assec/nombre d'observation. Les points d'observation sont ordonnés de l'aval à l'amont</i>	47
<i>Tableau 5: Estimations des volumes prélevables sur le secteur des Autizes selon les niveaux objectifs de gestion.</i>	50
<i>Tableau 6 : Evolution des niveaux piézométriques objectifs et piézométrie de crise pour le piézomètre du Grand-Nati (Oulmes)</i>	50
<i>Tableau 7 : Volume autorisé pour les unités de gestion des Autizes par l'Autorisation Unique de Prélèvement</i>	51
<i>Tableau 8 : : Description des réserves de substitutions des Autizes</i>	55
<i>Tableau 9 : Besoin en eau des principales cultures selon les ETM</i>	65
<i>Tableau 10 : Comparaison rendement moyen sur la plaine de Fontenay à Niort pour les principales cultures, enquête de terrain vs AquaCrop</i>	71
<i>Tableau 11: Evolutions des besoins nets annuels en eau médians par rapport au passé récent sur les principales cultures pour quatre types de sols, selon les scénarios d'émissions RCP 4.5 et 8.5.</i>	73
<i>Tableau 12: Volumes prélevables pour respecter les objectifs du SDAGE 2010-2015</i>	88
<i>Tableau 13 : Qualité des eaux aux points de pompages projetés</i>	94
<i>Tableau 14: Paramètre de qualité de l'eau mesuré, formules mobilisant les différentes bandes spectrales et résultats statistiques des validations</i>	97

Liste des figures

Figure 1: Localisation et topographie du bassin versant du Marais poitevin 25m	13
Figure 2: Zones humides et réseau hydraulique de surface du Marais Poitevin	14
Figure 3: Evolution de l'occupation du sol du Marais Poitevin	15
Figure 4: Coupe d'un labour en planches en ados avec rigoles	16
Figure 5: Le drainage et l'irrigation sur le périmètre de l'EPMP	16
Figure 6 : Gestion de l'eau en France, entités et niveau hiérarchiques	18
Figure 7: Localisation du Marais Poitevin, de l'EPMP, des unités de gestion et du bassin versant des Autizes.	18
Figure 8: Température, précipitation et demande évaporative moyenne mensuelle sur les unités deux unités de gestion des Autizes	20
Figure 9 : Evolutions des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle annuelle sur les deux unités de gestions des Autizes	21
Figure 10 : Gauche : Evolutions des températures moyennes annuelles sur les deux unités de gestions des Autizes. Droites : Evolution du déficit hydrique climatique (P-ETP) sur la période estivale (mai à septembre) et évolution de la pluie efficace sur la période hivernale (novembre à mars) estimée par la méthode de Thornwhaite pour un sol de RU à 70mm	21
Figure 11: Blocs diagrammes figurant l'évolution de la plaine de Vendée depuis le Jurassique inférieur	22
Figure 12: Blocs diagrammes figurant l'évolution de la plaine de Vendée depuis le Jurassique inférieur	22
Figure 13: Blocs diagrammes figurant l'évolution de la plaine de Vendée depuis le Jurassique inférieur	23
Figure 14: Localisation des masses d'eau souterraines du Marais poitevin	24
Figure 15: Stratigraphie, lithologie et hydrogéologie du secteur Est de la plaine du Sud-Vendée	25
Figure 16 : Entités géologiques affleurantes et localisation des coupes géologiques sur le secteur de Autizes	26
Figure 17: Coupe n°3 secteurs EST plaine Vendéenne	27
Figure 18: Coupe n°2 Sud-Nord secteur Est plaine Vendéenne	27
Figure 19: Zoom sur le cours inférieur de l'Autize sur les cartes piézométriques dressé par Bresson (1977)	29
Figure 20: Ouvrages, points d'observations et géologie simplifiée du secteur des Autizes.	30
Figure 21 : A gauche : Coupe technique et géologique du forage du Grand-Nati. A droite : Coupe géologique et diagraphie Gamma-Ray du forage du Grand-Nati	31
Figure 22: Chroniques piézométriques sur le secteur des Autizes	32
Figure 23: Evolution des niveaux piézométriques journaliers, du débit journalier de l'Autize et des précipitations décennales (bâtonnets bleux) pour l'année hydrologique 2001-2002	32
Figure 24: Gauche : Courbe des débits classés de l'Autize à St-Hilaire-des-Loges (1971-2022). Droite : Débit moyen mensuel et débit spécifique moyen mensuel de l'Autize à St-Hilaire-des-Loges (1971-2022)	33
Figure 25: Gauche : Débit moyen mensuel de l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges pour les mois de janvier, février et mars depuis 1972. Droite : Débit moyen mensuel l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges pour les mois de juillet, août et septembre depuis 1972	34
Figure 26: Débit de l'Autize à Saint-Hilaire des Loges et précipitations pondérées sur l'UG Autize Socle pour l'année hydrologique 2010-2011	35
Figure 27: Diagramme de Stiff et Piper, qualité eaux superficielles et souterraines sur le secteur des Autizes	36
Figure 28: Gauche : Evolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines du secteur des Autizes en relation avec les fluctuations des cotes piézométrique à Aziré. Droite : Evolution des teneurs en nitrates de l'Autize à St-Hilaire en fonction en relation avec les débits enregistrés à St-Hilaire	36
Figure 29 : Gauche : groie superficielle à Thiré (85). Droite : groie moyenne à Fontaines (85).	37
Figure 30: Répartition des assolements sur les unités de gestions du secteur des Autizes en 2021	38
Figure 31: Equilibre entre nappes de bordure et Marais en été	40
Figure 32: Gouffres, résurgences et sources de bordures du secteur des Autizes	41
Figure 33: Fluctuations réciproques des niveaux d'eau dans le marais des Nattes (Bief de Saint-Arnault) et de la piézométrie à Aziré durant l'été 2002 avec indication du sens du flux d'eau.	43
Figure 34: Gauche : Hauteur d'eau du puit de l'Aubier et du marais des Nattes. Droite : Hauteur d'eau du puit de l'Aubier et du piézomètre de Benet (Aziré) en fonction de la hauteur d'eau du marais des Nattes	44
Figure 35: Différence de hauteur d'eau entre le puits de l'Aubier-Gaillot et le Marais des Nattes	44
Figure 36: Lien entre les niveaux piézométriques à Oulmes et à Aziré selon les années et les mois	45
Figure 37: Niveau piézométrique journalier au Grand-Nati	46
Figure 38: Relation entre le niveau piézométrique au piézomètre d'Oulmes et le débit à la station St-Hilaire en valeur moyenne journalière	46

Figure 39: Gauche : Relation entre l'écoulement de l'Autize observé à la station de St Pierre-le-Vieux et son débit moyen journalier mesuré le même jour à Saint Hilaire-des-Loges. Droite : Relation entre l'écoulement observé et le niveau piézométrique moyen journalier enregistré le même jour au piézomètre du Grand-Nati	48
Figure 40: Volume captés annuels et nombres de forages actifs sur le Bassin-versant des Autizes	52
Figure 41 : Localisation des points de prélèvements, du type d'eau capté, et des volumes sur les unités de gestion des Autizes	53
Figure 42: Localisation des réserves de substitutions du secteur des Autizes et des points de prélèvements	54
Figure 44: Seuil de remplissage des réserves de substitutions des secteurs des Autizes sur le piézomètre du Grand-Nati	56
Figure 45 : Chroniques piézométriques annuelles au Grand-Nati avant-après 2010. La courbe noire représente les valeurs médianes journalières et la courbe bleu est une courbe lisse calculée par régression locale.	59
Figure 46: Relation entre les pompages pour le remplissage de la réserve d'Oulmes Sud et le niveau d'eau du marais des Nattes, du puis de l'Aubier Gaillot et du piézomètre d'Aziré (Benet)	60
Figure 47: Evolution interannuelle des variations de volumes cumulés mensuels sur l'ensemble des réserves des Autizes (courbe noire) en parallèle avec le déficit hydrique climatique mensuel (P-ETP) en bleu clair	61
Figure 48: Evolution intra-annuelle des variations de volumes cumulés mensuels sur l'ensemble des réserves des Autizes.	62
Figure 49 : Gain journalier de l'ensemble des réserves du secteur des Autizes	62
Figure 50: Nombre de jours sous le seuil d'autorisation du remplissage au piézomètre du Grand-Nati	63
Figure 51: Evolution journalière négative du volume de l'ensemble des réserves du secteur des Autizes interprétées comme un usage de l'eau des réserves	63
Figure 52: Evolution du nombre de jour sous le seuil de remplissage au piézomètre du Grand-Nati et à la station de débit de l'Autize à St-Hilaire, pour les mois de novembre à mars	64
Figure 53 : Bilan hydrique dans AquaCrop	68
Figure 54 : Evolution et comparaison des cumuls mensuel estival et hivernal du déficit hydrique climatique (P-ETP) sur l'unité de gestion Autize nappe (UGVP 14) pour les réanalyses Safran, et les deux RCM	69
Figure 55: Carte des réserves utiles en eau, de l'épaisseur de sol et des grands types de sols sur le secteur des Autizes	70
Figure 56: Rendement médian (box-plot) et moyen (point rouge) des principales cultures sur la période 1975 – 2005 (chroniques climatiques Safran) pour l'Unité de Gestion Autize Nappe modélisé par AquaCrop.	71
Figure 57: Comparaison entre les résultats AQUACROP et une sonde d'humidités du réseau AQUALIS de l'évolution de la teneur en eau cumulée sur l'ensemble du profil d'un sol de groie moyenne entre le 12 avril et le 1 juin 2023	72
Figure 58 : Evolutions des besoins nets annuels en eau modélisées entre le passé récent, le futur proche et le futur lointain pour les cultures principales selon les différents types de sols, pour le scénario d'émission RCP 4.5	72
Figure 59: Evolution de la relation précipitation-recharge sur l'ensemble des profils de sols entre le passé proche (PR), le futur proche (FP) et le futur lointain (FL), selon trois types de cultures pour le scénario d'émission RCP8.5.	74
Figure 60 : Comparaison de la recharge estimée par la méthode de Thornthwaite et par la modélisation AquaCrop selon les types de sols et les périodes passé récent, futur proche et lointain	75
Figure 61: Diagraphies par imagerie formation du Bathonien/Bajocien au site H+ de Poitiers	83
Figure 62: Localisation des forages et de la perte de la Smagne. Communes de Bessay et de St Jean-de-Beugné – Echelle 1/25000 ^{ème}	84
Figure 63 : Protocole de gestion des Autizes.	89
Figure 64: Courbe standard de consommation	89
Figure 65 : Détails technique des réserves de substitution	91
Figure 66: Comparaison des niveaux piézométriques de la nappe du Dogger de janvier 2005 restitués par le modèle avec et sans pompage hivernaux pour le remplissage de retenues de substitution	92
Figure 67: Impact de la mise en place des retenues sur le bassin de l'Autize sur le piézomètre de grand-Nati	92
Figure 68: Comparaison des débits de l'Autize entre le modèle calé et la simulation avec retenues de substitution sur un point fictif en bordure du Marais	93
Figure 69: Evolution de la concentration en chlorophylle-a sur les 50 premier cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord de juin à septembre 2022 à partir des images Sentinel 2	97
Figure 70: Concentration cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord en août de 2017 à 2020 à partir des images Sentinel 2.	97
Figure 71: Evolution des concentrations en chlorophylle-a et cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord entre 2018 et 2022 à partir des images Sentinel 2	98

Remerciements

Je tiens tout d'abords à remercier Florence Habets qui a accepté d'encadrer mon stage de recherche sur le sujet, et qui a témoigné d'un enthousiasme et d'un soutien sans faille, malgré toutes ses responsabilités et la multitude de projets dans lesquelles elle est engagée, avec une disponibilité et une bienveillance que je n'aurais jamais imaginé possible dans le milieu de la recherche.

Je remercie également tout particulièrement mes professeurs et encadrants Serge Brouyère et Philippe Orban, pédagogues hors pairs, avec qui j'ai pu suivre des cours particulièrement passionnants et motivants. Je remercie aussi mon professeur Joost Wellens pour sa disponibilité, son enthousiasme et ses conseils.

Je veux remercier aussi François-Marie Pellerin pour sa pédagogie, sa disponibilité et le temps pris à nous faire découvrir la zone de marais et son fonctionnement hydrogéologique en relation avec la plaine. David Bailly pour le temps pris à présenter le chevelu du bassin versant des Autizes en Deux-Sèvres, et pour sa créativité et ingéniosité débordante. Anne-Morwenn Pastier pour nos échanges et ses conseils ainsi que David Briffaud pour sa connaissance et son attachement au territoire de son enfance.

Je remercie également le directeur du syndicat mixte Vendée, Sèvre, Autize (SMVSA) Fabrice Enon, François Josse (animateur de la CLE SNMP), Daniel Lepercq et Marin Boulin (pour la CACG) ainsi que Mme Audrey Chauvet, responsable du PTGE du secteur des Autizes pour le temps accordé à nous présenter les enjeux du territoire ainsi qu'un retour d'expérience sur le programme de substitution. Et enfin Mr Yoann Roy, pour le temps pris à me partager les données centralisées par le SIEMP.

Introduction

Les nombreux épisodes de sécheresses qui se sont succédé et en particulier celui de l'année 2022, ont porté au centre de l'attention médiatique des pays de l'Europe de l'Ouest la problématique de la disponibilité de l'eau et de la dépendance de nos sociétés à cette ressource.

Au sein de nombreux territoires on observe une multiplication des projets de stockage d'eau sous forme de retenues, qui sont souvent mis en avant comme solutions d'adaptation pour l'agriculture à l'intensification et à la multiplication des sécheresses.

De l'autre côté plusieurs épisodes récents de confrontations ont également mis en lumière la conflictualité et les controverses qui peuvent accompagner des projets d'infrastructures de stockages d'eau en France. Les événements de Sainte-Soline ont fait découvrir au grand public un type de réserves d'eau particuliers et peu connu jusqu'alors dans les régions du centre et du nord de l'Europe de l'Ouest : les réserves de substitutions alimentées par des prélèvements en nappes. Les *réserves* sont remplies par pompages, elles se distinguent des habituelles *retenues* collinaires stockant de l'eau qui ruisselle de manière gravitaire et qui peuvent être situées directement en barrage de cours d'eaux, alimentées en dérivation, ou même déconnectée du réseau hydrographique.

En Nouvelle Aquitaine et sur le territoire du Marais poitevin, de nombreuses réserves de ce type, privées et collectives, ont été mises en place à partir des années 2000 et 2010 pour venir répondre à des problématiques liées aux impacts des prélèvements agricoles sur les zones humides et les cours d'eaux qui engendraient une conflictualité entre les usagers devenue particulièrement saillante depuis les années 90'. Il s'agit de bassins étanches de plusieurs hectares, entourés de digues d'une dizaine de mètres de haut, avec des volumes de plusieurs centaines de milliers de m³. Plusieurs centaines de projets de ce type sont en cours ou à l'étude à travers la France.

Ce développement pose néanmoins plusieurs problématiques, notamment d'impact cumulé sur le système hydrologique et le cycle de l'eau, qu'il s'agit de pouvoir quantifier au même titre que la capacité de ces retenues à répondre aux besoins actuels et futurs. On peut se questionner sur les impacts quantitatif et qualitatif sur la ressource en eau souterraine et superficielle, et se demander s'il existe des seuils au-delà desquels la substitution amènerait des effets néfastes. L'augmentation de l'offre peut également exposer au risque d'accroître la dépendance d'un territoire à une ressource qui est soumise à de forte variabilité hydro-climatique.

Si les impacts environnementaux des grandes retenues et barrages sont assez bien documentés, et représentent un champ d'étude à part entière depuis un certain temps, les impacts des petites retenues d'irrigations le sont beaucoup moins et particulièrement la question de leurs impacts cumulés à l'échelle du bassin versant, alors même qu'à l'échelle planétaire les volumes cumulés sont du même ordre de grandeur (Carluer et al., 2016). Plusieurs travaux se sont attachés à caractériser les impacts cumulés des petites retenues d'eau sur l'hydrologie (Nathan et Lowe, 2012 ; Habets et al., 2018), ainsi que leur capacité de remplissage dans une perspective de changement climatique (Habets et al., 2014). A la demande du ministère de l'écologie une expertise scientifique collective a été réalisée par une quinzaine d'experts qui ont passé en revue la littérature scientifique internationale sur les impacts cumulés des retenues d'eau sur le milieu aquatique (Carluer et al., 2016).

Concernant les impacts sur l'hydrologie et l'hydrogéologie, l'expertise conclut qu'il existe globalement assez peu d'études sur les impacts cumulés, les études sont généralement menées par modélisation et très peu sont basées sur des observations. Au niveau des travaux par modélisation ce sont particulièrement les flux liés à l'infiltration et l'évaporation qui représentent des points d'incertitudes, alors que pour les études se reposant sur des données observées les limites concernent plutôt l'accès aux données sur des temps longs qui permettent de distinguer les effets anthropiques de la variabilité naturelle de la ressource (Carluer et al., 2016).

Problématique et objectif de recherche

Nous nous intéressons spécifiquement au bassin versant des Autizes, affluent rive droite de la Sèvre-Niortaise, sur lequel le premier projet collectif de réserves de substitution de la plaine du Sud-Vendée ont été mis en place et pour lequel l'on disposait du plus grand historique de données.

La question de recherche de ce travail peut être déclinée en plusieurs sous-questions. Premièrement quel est le contexte et les enjeux propres au territoire sur lequel se sont mis en place les premiers projets de substitution et à quelle problématique spécifique sont venus répondre ces projets ? Comment et sur quels critères ont été établis les règles de gestions qui encadrent leur fonctionnement opérationnel ? Ensuite quels sont les impacts sur l'hydrologie et l'évolution des prélèvements agricoles et de leurs dynamiques ? Dans quelle mesure il est possible d'estimer ces impacts à partir d'une approche classique se basant uniquement sur l'historique des données observées sur les ouvrages de mesures ? Enfin, comment anticiper l'évolution des besoins en eaux des cultures et les possibilités de remplissages de ces ouvrages dans le futur ?

L'objectif de ce travail est donc multiple, il s'agit de rassembler et d'analyser les données et les éléments bibliographiques disponibles concernant les impacts quantitatifs sur l'eau et les rivières des retenues de substitutions, la pertinence des seuils de gestion et de remplissage, ainsi que l'adéquation entre la demande d'irrigation et les volumes exploitables sur le bassin versant des Autizes dans le contexte spécifique de la gestion quantitative de l'eau dans plaine du Sud-Vendée. Enfin, l'objectif est aussi d'apporter des éléments sur l'évolution prévisibles des besoins en eau agricole sur le territoire dans un contexte de changement climatique.

Avec le premier chapitre, nous présentons le contexte général du Marais poitevin et de la gestion quantitative de l'eau au sein des bassins versants qui l'alimentent afin d'introduire la problématique spécifique de l'adéquation de l'offre et de la demande en eau d'irrigation, en lien avec la mise en place de projets de réserves de substitutions.

Ensuite, dans un deuxième chapitre, nous parcourons en détail les caractéristiques du bassin des Autizes, en se focalisant sur le fonctionnement hydrogéologique spécifiquement. Nous apportons des éléments afin de cerner précisément les relations entre les eaux souterraines et les eaux superficielles, ainsi que leur réactivité aux précipitations. Nous tenterons d'identifier des valeurs seuils et ce qui relève du fonctionnement naturel ou influencé de l'hydrosystème.

Dans un troisième chapitre nous retraçons l'historique de l'évolution de la gestion des prélèvements pour l'irrigation sur la plaine du Sud-Vendée, l'établissement des seuils de gestion et la définition des volumes prélevables. Nous nous focaliserons également sur les volumes prélevés sur le secteur des Autizes avant de nous concentrer sur les réserves de substitutions présentes sur le bassin des Autizes. Nous apportons des éléments de description des ouvrages ainsi que des détails techniques et des éléments sur leur fonctionnement. Nous passons en revue les impacts prévisibles de ce type de projet et les éléments soulevés par les études d'impact existantes avant d'apporter quelque élément sur les effets observables sur la piézométrie et la relation nappes-marais. Ensuite nous nous focaliserons plus en détail sur les dynamiques inter et intra-annuelles des volumes d'entrées et de sorties. Enfin, nous étudierons également les valeurs seuils de piézométrie et de débit qui ont été fixées pour autoriser le remplissage, et l'évolution de leur dépassement en période hivernale.

A travers le dernier chapitre, nous tenterons d'apporter des éléments pour anticiper et estimer l'évolution des besoins en eau des principales cultures du secteur dans un contexte de changement climatique. Nous passerons également en revue différents éléments de bibliographie pour tracer les grandes tendances prévisibles et comparer nos résultats.

Matériel et méthodes

Au-delà des travaux par modélisation qui ont déjà été réalisés, le parti pris de ce travail est d'explorer ce qu'il est possible de mettre en lumière uniquement à partir de l'historique des données observées et disponibles. C'est donc une approche hydrologique et hydrogéologique globale qui est mise en œuvre afin d'identifier des indicateurs et d'évaluer des potentiels impacts, en suivant les recommandations de la note d'orientation méthodologique du BRGM pour étudier l'impact des retenues de substitutions sur la ressource en eau en région Poitou-Charentes (Normand et Lavie, 2001). Le matériel exploité et la méthode mise en œuvre pour les chapitres 2 et 3 est présenté ci-dessous, tandis que pour le chapitre 4 plus de précision est donnée dans le corps de texte.

Pour le chapitre 2, nous avons synthétisé toutes les études et rassemblé toutes les données disponibles sur la géologie et l'hydrogéologie de la plaine du Sud-Vendée. Nous avons également traité et pondéré pour les limites de notre secteur d'étude, des données concernant la météorologie (les réanalyses SAFRAN) et les assolements (recensement général agricole).

Nous avons récupéré et analysé conjointement les données disponibles pour tous les ouvrages de mesures du secteur sur les plateformes de centralisation des données publiques sur l'eau : NAIADES pour la qualité des eaux de surfaces, ADES pour les données piézométriques et de qualité des eaux souterraines ou HydroPortail pour les chroniques de débits. Nous avons mis en parallèle nos observations avec les résultats des différentes études qui ont déjà pu être menées sur le secteur et nous avons réactualisé certaines analyses avec les données actuelles.

Pour le chapitre 3, nous avons synthétisé toutes les études et différentes méthodologies qui ont été mises en œuvre pour la détermination des volumes prélevables et l'établissement des normes de gestions, en nous concentrant sur ce qui a été déterminant pour leur fixation et sur l'évolution du cadre de gestion. Nous avons également récupéré et pondéré les données de la BNPE (Banque Nationale des Prélèvements en Eau) sur le secteur des Autizes afin de caractériser l'évolution récente des volumes prélevés et les comparer avec les volumes autorisés.

Ensuite, nous avons réalisé une synthèse bibliographique des effets potentiels et des effets modélisés dans le cadre d'études d'impacts des retenues de substitutions sur la ressource en eau. Les données concernant les volumes transitant par les réserves de substitutions ont été analysées en parallèle aux chroniques piézométriques, météorologiques, de débits et de hauteurs d'eaux. L'objectif était d'analyser à la fois les effets des prélèvements hivernaux sur les eaux superficielles et la piézométrie mais aussi l'évolution et la dynamique des prélèvements.

I - Genèse d'une problématique dans le Marais poitevin

I - 1. De la formation à l'aménagement du marais

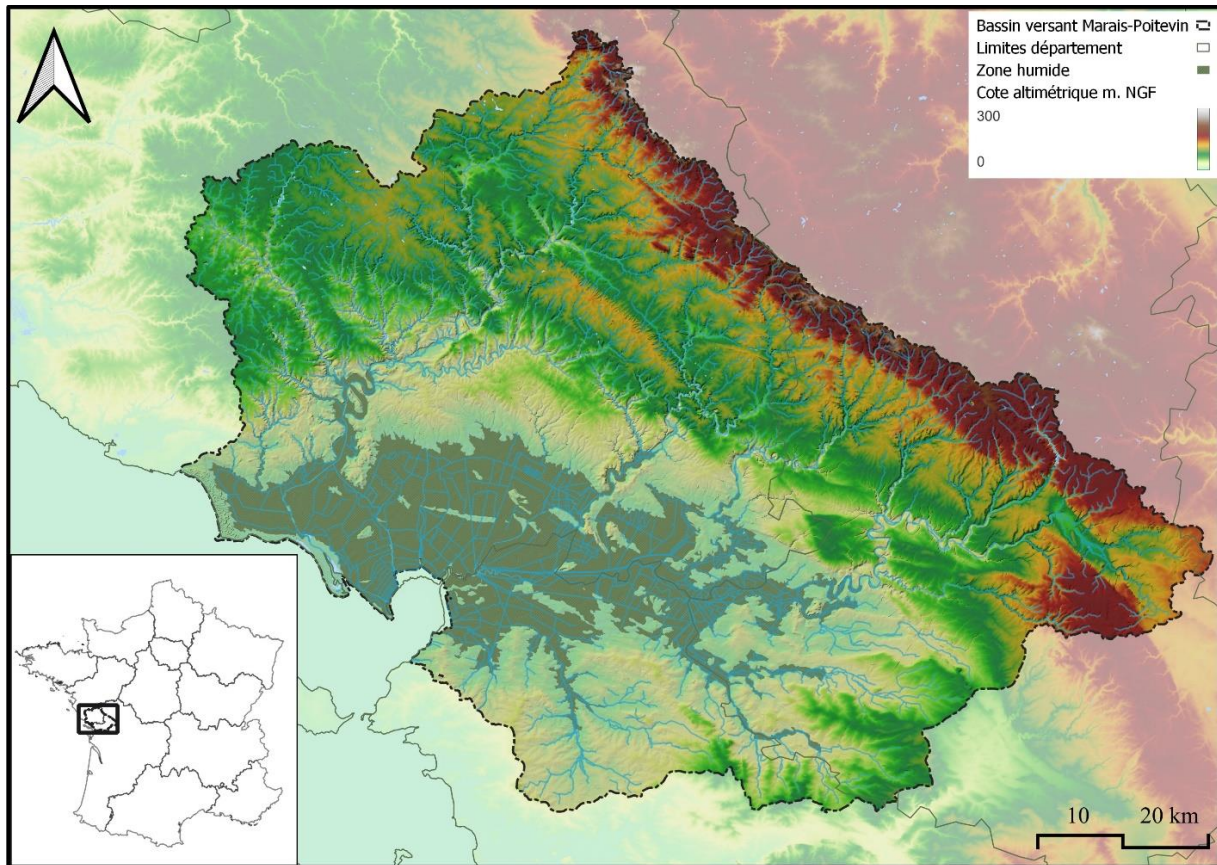


Figure 1: Localisation et topographie du bassin versant du Marais poitevin (Données : BD CARTHAGE, BDALTI 25m (IGN))

Durant le quaternaire une vaste dépression s'est créée à la suite de forte érosion favorisée par les périodes de glaciations et inter glaciations, elle est ensuite envahie par la mer vers 8000 ans av. JC. lors de la transgression flandrienne déclenchée par la fonte des glaces du Würm (Coulais, 2015). Ce golf marin est progressivement comblé par des dépôts de vases coquillères argilo-sableuses et argileuses d'origine marine et d'alluvions fluviales (Ducloux et Nijs, 1972). A partir de 1500 ans av. J.-C. la mer s'est progressivement retirée pour retrouver son niveau actuel en laissant une vaste zone de marais qui forme le Marais poitevin actuel, deuxième zone humide de France et la plus vaste de la façade atlantique française (Coulais, 2015).

Ce sont les moines des différentes abbayes fondées à proximité et au sein du marais qui vont réaliser les premiers travaux de dessèchements en formant des digues et des canaux vers le 13-ème siècle, mais c'est réellement à partir du 17-ème siècle que les travaux deviennent conséquents, via des investissements hollandais et poitevins ainsi qu'avec la création de syndicats de marais qui coordonnaient les travaux « d'assainissements » (Coulais, 2015). En 1640, 6400 ha de marais sont déjà asséchés pour être mis en culture et des terres sont récupérées sur la mer pour former des polders (Simon, 1998). Au cours du 19-ème siècle on aménage des marais mouillés pour évacuer l'eau, on canalise en partie les rivières pour la navigation et l'on construit des écluses (Coulais, 2015).

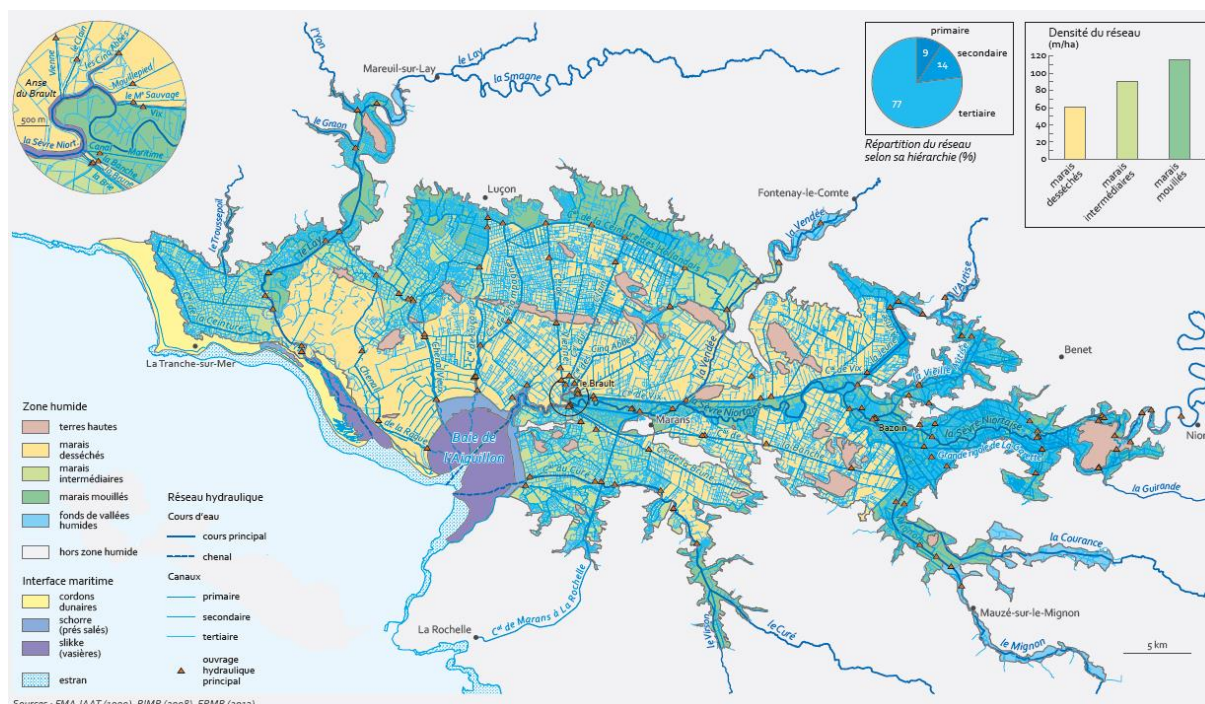


Figure 2: Zones humides et réseau hydraulique de surface du Marais Poitevin (« Atlas du Marais poitevin », EPMP, 2015).

La valorisation agricole d'un marais consiste à maîtriser l'eau contenue dans l'horizon supérieur du sol où l'on retrouve le système racinaire des plantes cultivées, en isolant les parcelles des apports du bassin versant par l'édification de digues, tout en évacuant les apports météoriques par un réseau de canaux et de fossés (Huet et Martin, 2003).

Au sein du Marais poitevin on retrouve différentes entités qui forme la zone humide, elles sont représentées sur la figure ci-dessus. Il y a d'un côté les marais desséchés drainés et protégés des inondations hivernales, et les marais mouillés composés de prairies inondables qui jouent un rôle d'expansion des crues. Les marais desséchés ont une surface beaucoup plus importante et sont concentrés autour de la baie de l'Aiguillon, tandis que les marais mouillés sont situés en périphérie, en continuité avec les fonds de vallées, ils représentent une moindre superficie.

Au sein de la zone humide on retrouve également des îlots calcaires qui ont résisté à l'érosion, des marais intermédiaires et des fonds de vallées humides. Le réseau hydraulique de canaux et de biefs qui draine l'ensemble de la zone humide, se décompose entre : le réseau principal qui regroupe les voies les plus large et notamment les voies navigables, le réseau secondaire qui structure les marais mouillés et desséchés, ainsi que le réseau tertiaire qui est particulièrement dense au sein des marais mouillés.

Un ensemble d'ouvrages hydrauliques allant de petites vannes ou pelles manuelles jusqu'aux écluses automatisées permet de maintenir artificiellement des niveaux d'eaux précis au sein des biefs et des canaux, ces niveaux varient selon les saisons, avec entre deux à quatre régimes différents et des niveaux qui peuvent varier de 15 cm à plus d'un mètre selon les secteurs entre l'été et l'hiver. Globalement, les niveaux sont maintenus bas en hiver, à la fois pour pouvoir écrêter les crues mais également afin de mettre hors eau les sols et garantir assez de portance pour pouvoir accéder aux parcelles, et ils sont maintenu hauts en été, notamment afin que les fossés ne s'assèchent pas (Huet et Martin, 2003).

I - 2. Agriculture

L'occupation du sol du Marais poitevin a fortement évoluée au fil des derniers siècles. Au 17^{ème} siècle le Marais était devenu une vaste zone de production de céréales concentrée dans le marais desséché tandis que les marais mouillés soutenaient une activité d'élevage, la baie de l'Aiguillon était plus large qu'actuellement et les milieux naturels comme les marécages et les bois occupaient encore le double des surfaces cultivées (Coulais, 2015).

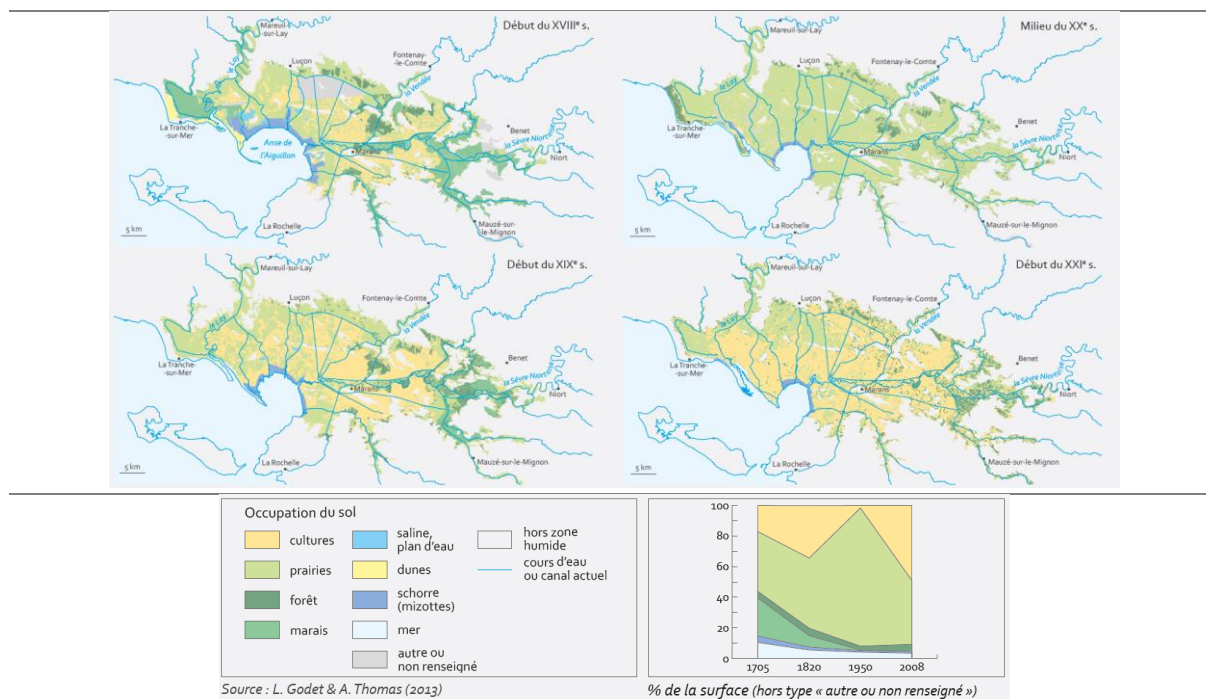


Figure 3: Evolution de l'occupation du sol du Marais Poitevin (« Atlas du Marais poitevin », EPMP, 2015).

Au cours du 19^{ème} les cultures spécifiques et adaptées à l'écologie du Marais comme le lin, le chanvre et l'osier sont abandonnées, vers 1950 les marécages ont totalement disparu et les prairies représentent quasiment l'entièreté des surfaces à la suite du développement de la production laitière (Coulais, 2015). C'est à partir des années 60 que l'agriculture se transforme profondément à la suite de la mise en place de la Politique Agricole Commune (PAC) et du Traité de Rome qui en définit les objectifs, à savoir, augmenter la productivité via le progrès technique et diminuer les prix, ce qui a comme répercussion une baisse drastique du nombre d'exploitation (Safege, 2004).

Actuellement le territoire du bassin versant du Marais poitevin est essentiellement agricole, avec une grande part (60%) des surfaces dédiées aux grandes cultures (céréales et oléo-protéagineux), particulièrement dans le secteur de plaine et dans le marais, et ensuite des surfaces fouragères avec des zones en rotations prairies temporaires et maïs ensilage situées dans le bocage et des prairies permanentes également situées dans le marais (Coulais, 2015).

I - 3. Drainage et irrigation

Deux pratiques connexes à la mise en place de la PAC et à l'objectif de productivité intensifiée se sont particulièrement développées à partir des années 70 : le drainage et l'irrigation. En 1955 un programme de dessèchement complet du Marais poitevin était approuvé et jusque dans les années 1980 des assèchements étaient prévus, notamment dans le schéma d'aménagement des marais de l'Ouest (Simon, 1998). La doctrine officielle s'est inversée, et l'intérêt de la conservation du marais a été progressivement reconnue par tous. Dans son rapport de 1998 Simon estimait d'ailleurs que les aides

publiques couplées aux lois du marché poussaient toujours le secteur agricole vers la destruction de la zone humide.

Au niveau du drainage il faut distinguer la construction de fossés qui permettent de rabattre la nappe affleurante au niveau bas du fossé et la pose de drains enterrés. Une pratique qui a longtemps perduré dans le Marais est le système « ados-rigole » qui permet de rabattre le niveau de la nappe affleurante à 0.50 m de profondeur, avec des labours en planches en ados séparés par des rigoles qui rejoignent des fossés (Huet et Martin, 2003).



Figure 4: Coupe d'un labour en planches en ados avec rigoles (Casanova, 1861 : p. 101)²

La pose de drains enterrés n'a commencé que dans les années 70, elle consiste en l'aboutissement des travaux de dessèchement du Marais et était accompagné par le remembrement des parcelles. Elle permet de faciliter l'accès aux parcelles et le travail du sol, d'augmenter les rendements et de réaffecter aux cultures une partie de la surface agricole utile occupée par les rigoles (Huet et Martin, 2003).

Il s'agit d'enterrer des drains en PCV annelés au fond de tranchées, avec un espacement de 15 à 20 mètres, les drains sont connectés à des collecteurs qui débouchent dans un puits où une pompe refoule les eaux vers des fossés, chaque puits regroupe les drains d'îlots de 40 à 100 ha (Huet et Martin, 2003). Le drainage de ce type va avoir des impacts sur le régime hydrologique, en mobilisant les eaux de la réserve d'eau du sol facilement utilisable par les plantes (RFU), il va notamment avoir un effet tampon et provoquer un décalage dans le temps des débits de pointes (Huet et Martin, 2003). Selon Huet et Martin, il est possible également que l'assèchement du marais via le drainage ait des impacts sur la zone humide en modifiant l'équilibre et la charge des eaux souterraines (2003). Cette pratique va également favoriser le lessivage des éléments solubles comme les nitrates et les produits phytosanitaire (Huet et Martin, 2003). Aujourd'hui près de 30 000 ha de la zone humide sont équipés de drains enterrés, soit la quasi-totalité des secteurs de marais desséchés (Coulais, 2015).

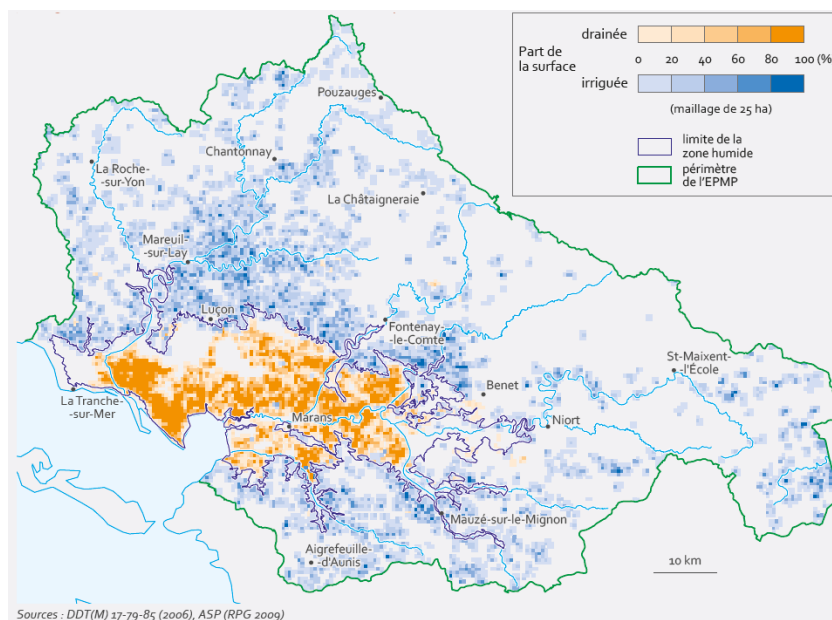


Figure 5: Le drainage et l'irrigation sur le périmètre de l'EPMP (« Atlas du Marais poitevin », EPMP, 2015).

Si les surfaces drainées se concentrent au sein de la zone humide, comme on peut l'observer sur la figure ci-dessus, les surfaces irriguées se concentrent en périphérie de la zone humide sur les zones de plaines calcaires au nord et au sud du Marais et plus accessoirement sur les secteurs de bocage au

² Mots de l'agronomie INRAE, « https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php/Fichier:MotsAgro_Ados_etc_les_mots_1.jpg », consulté le 18/06/23.

nord. Au niveau de l'ensemble du bassin versant, 15 % de la SAU, soit 80 000 ha sont irrigables, ce sont principalement les grandes cultures qui sont concernées, et tout particulièrement le maïs grain dont 50% des surfaces sont irriguées (Coulais, 2015).

C'est entre 1979 et 1988 qu'il y a eu la plus grande augmentation suite à l'effet conjugué de la sécheresse de 1976 et de la politique agricole européenne, ainsi que d'une politique d'incitation par subvention des travaux de forage et d'acquisition du matériel relatifs à l'irrigation (Safege, 2004). Les prêts bancaires pour les agriculteurs étaient conditionnels à l'irrigation (Simon, 1998). Entre 1988 et 1993 les surfaces irriguées ont doublées, les chambres d'agriculture et les centres de gestions encourageaient les investissements, et des prêts bonifiés étaient accordés (Pichot, 2019).

Avec la réforme de la PAC en 1992, on remplace les prix garantis par des aides directes, dans le but d'améliorer la compétitivité de l'agriculture européenne face aux prix mondiaux, et les aides sont d'autant plus importantes pour les surfaces irriguées, (en 2002 elles étaient de 464 euros/hectare pour des céréales irriguées et de 346 pour non irriguées ; Pichot, 2019).

I - 4. Déficits

Au-delà de la problématique de la mise en culture des prairies permanentes via le drainage, deux autres problématiques sont apparues au cours des années 90.

Le biseau salé est remonté à l'intérieur des terres, et a pu être observé dans certains forages du Sud-Vendée. Sa progression dépend du niveau de la mer mais aussi directement de la charge des eaux souterraines sous les terres continentales et donc des prélèvements pour l'irrigation en périphérie du Marais (Huet et Martin, 2003).

Les prélèvements agricoles dans les secteurs de plaine et les sous bassins versant du Marais ont également entraîné un déficit d'apport au Marais ainsi qu'un assèchement des réseaux périphériques tertiaires et parfois secondaires. L'assèchement des fossés et des canaux est problématique notamment car lorsqu'ils sont dénoyés ils perdent leur étanchéité (Huet et Martin, 2003).

I - 5. Institution de gestion de l'eau

Plusieurs niveaux hiérarchiques de gestion de l'eau se superposent sur le Marais poitevin, il existe de nombreuses entités aux prérogatives différentes. Les différents niveaux hiérarchiques de la gestion de l'eau en France sont représentés sur la figure ci-dessous. Avec la loi sur l'eau de 1992 la législation a instauré la création de schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), qui visent à définir au niveau du bassin versant les objectifs qualitatifs et quantitatifs pour la ressource en eau. Ils sont mis en œuvre et révisés par des commissions locales de l'eau (CLE) composées d'élus locaux, d'usagers et de représentants de l'état.

L'Institution Interdépartementale du Bassin de la Sèvre Niortaise (IISBN) a été créée en 1987, elle est propriétaire et gestionnaire du domaine public fluvial de la Sèvre Niortaise, des Autizes et du Mignon et porte également les SAGE de Vendée et de Sèvre Niortaise et Marais poitevin.

Au niveau de la gestion du réseau hydraulique, il existe aussi des acteurs privés comme les syndicats de marais qui ont historiquement assuré la gestion des ouvrages régulant les niveaux d'eaux dans leur secteur. Aujourd'hui ils sont une quarantaine. On retrouve également les collectivités territoriales via quatre syndicats mixtes (le Syndicat mixte du Marais Poitevin, du bassin de la Vendée, de la Sèvre et des Autizes, le Syndicat mixte du Marais Poitevin-Bassin du Lay, le syndicat mixte des rivières et marais d'Aunis et le syndicat mixte du bassin versant de la Sèvre Niortaise).

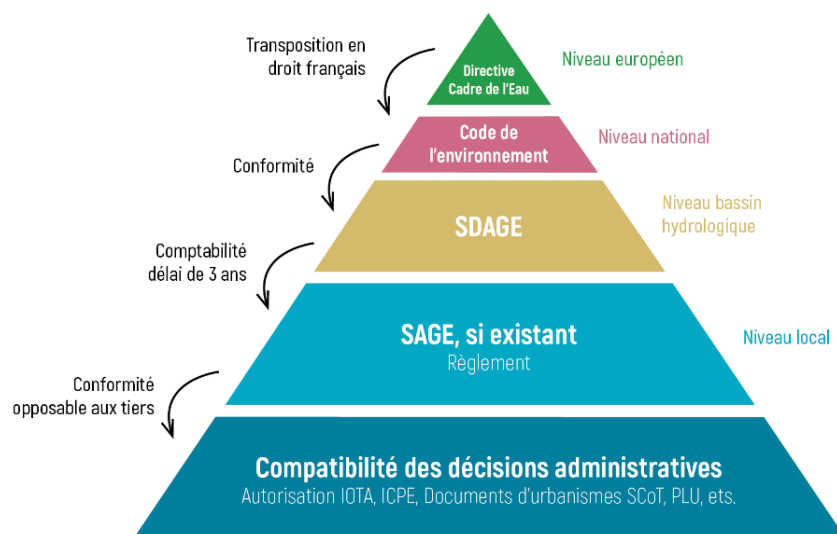


Figure 6 : Gestion de l'eau en France, entités et niveau hiérarchiques. (Source : Sage-Garonne)³

Les SAGEs sont subordonnés et sont tenus de mettre en œuvre les dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), qui est défini et périodiquement révisé à l'échelle du bassin hydrographique. Comme illustré sur la figure ci-dessous, on retrouve trois SAGEs sur le bassin versant du Marais poitevin, tous inclus dans le SDAGE Loire-Bretagne.

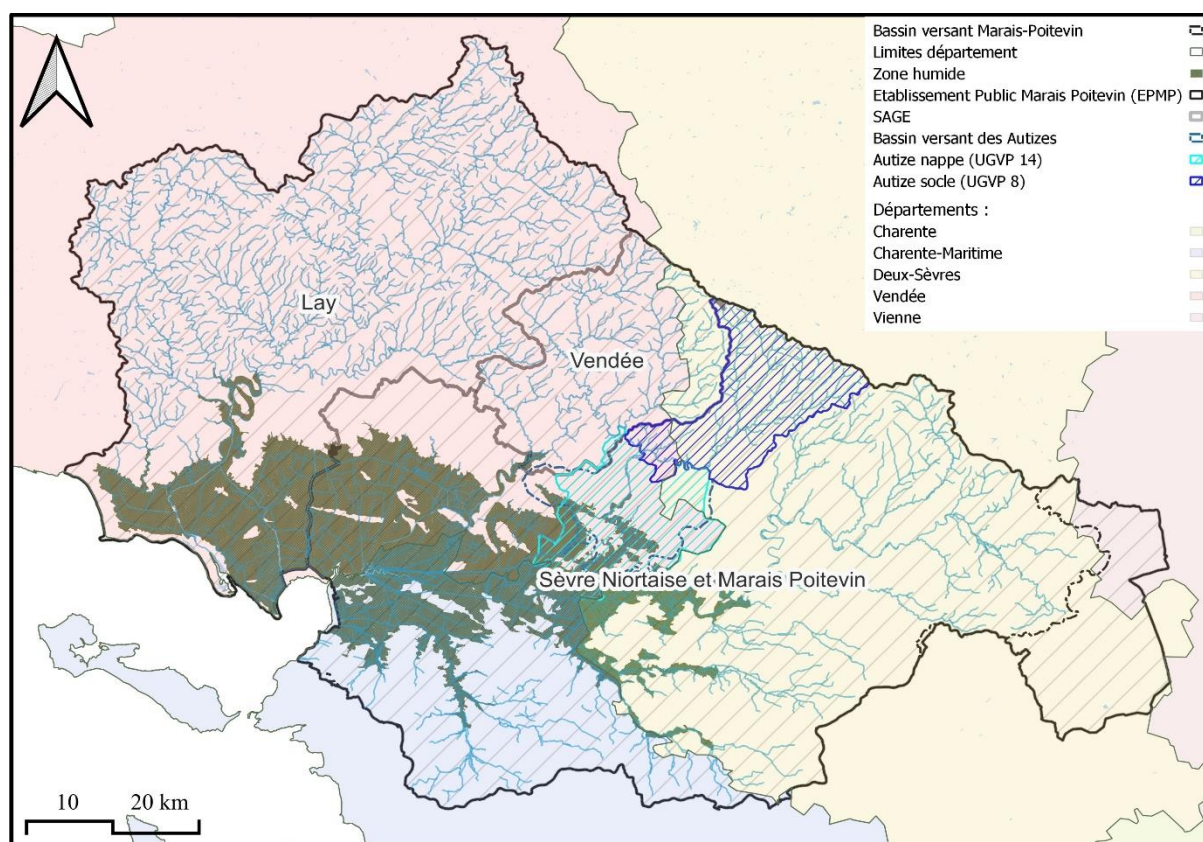


Figure 7: Localisation du Marais Poitevin, de l'EPMP, des unités de gestion et du bassin versant des Autizes.

³ SAGE Garonne, « <https://www.sage-garonne.fr/sage/la-portee-juridique-du-sage/> », consulté le 06/06/23.

I - 6. Contentieux européen

En 1999, la France a été condamnée par la Cour de justice de l'Union européenne au titre de la mauvaise application de la directive Oiseaux sur le périmètre du Marais poitevin, pour son manque de mesure de protection du patrimoine naturel face aux pressions agricoles et une gestion de l'eau non favorable à la zone humide (EPMP, 2013). En réaction, un plan d'action pour le Marais poitevin est adopté par le gouvernement pour 2003-2012, mais il est jugé insuffisant en 2009.

En 2011 est alors créé l'Etablissement Public du Marais Poitevin (EPMP), structure opérationnelle qui a comme prérogative à la fois la gestion des niveaux d'eau dans le marais, le suivi de la biodiversité et le pilotage du site Natura 2000 ainsi que la gestion des prélèvements d'eau du secteur agricole. L'EPMP va également coordonner la répartition et la définition des prélèvements pour l'irrigation autorisés pour un ensemble d'Unité de Gestion des Volumes Prélevables (UGVP) via un Organisme Unique de Gestion Collective (OUGC), les règles de gestion de l'eau, et la coordination des SAGE (EPMP, 2013).

En 2000 on a estimé au niveau de l'ensemble du bassin d'alimentation du Marais Poitevin, qu'il serait nécessaire de réduire de moitié les prélèvements autorisés, estimés alors à 80 millions de m³, pour assurer l'alimentation du Marais (CACG, 2005). C'est dans ce contexte qu'il a été établi que la compensation de la moitié des prélèvements par de nouvelles ressources était en accord avec l'objectif d'aménagement et de gestion concertée énoncée par le SDAGE Loire-Bretagne.

Afin de faire face aux nombreux problèmes de gestion quantitative de l'eau et de conflits d'usages sur leur territoire, les bassins du Lay, de la Vendée et des Autizes ont mis en place progressivement des programmes d'actions pour retrouver une gestion équilibrée de la ressource en eau. Cela s'est traduit uniquement par la mise en œuvre d'un programme de substitution pour le secteur des Autizes (entre 2007 et 2011), et par des contrats territoriaux de gestion quantitative (CTGQ) pour la Vendée et le Lay, comprenant également des programmes de substitutions (entre 2007 et 2017), ces contrats sont les premiers du genre sur le bassin Loire-Bretagne (Lanoiselée, 2021).

Ceux-ci ont trois objectifs principaux :

- contribuer à l'atteinte du bon état quantitatif des masses d'eaux souterraines
- améliorer la qualité écologique du Marais poitevin
- améliorer le fonctionnement des cours d'eau et zones humides associées

Avant l'établissement du SAGE Marais Poitevin Sèvre-Niortaise, le programme des Autizes s'est mis en œuvre avec deux axes, la création de 10 réserves de substitutions avec remplissage principalement par les nappes et l'élaboration d'une gestion collective de l'utilisation de la ressource en eau par le secteur agricole. Cette gestion est supervisée par l'Organisme Unique de Gestion Collective (OUGC), branche de l'EPMP, coordonnée par Syndicat Mixte Vendée-Sèvre-Autize (SMVSA) et c'est la Compagne d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) qui en est le délégataire de service public, et qui pilote les prélèvements de façon à éviter d'atteindre les seuils de restrictions

L'Autize est un affluent rive droite de la Sèvre-Niortaise, à cheval sur le département des Deux-Sèvres et de la Vendée, à son entrée du Marais poitevin elle se sépare en deux bras qui alimentent des zones de Marais mouillés. Son bassin versant est attaché au SAGE et à la CLE de la Sèvre Niortaise et Marais Poitevin (SNMP), l'on y retrouve deux unités de gestion des volumes prélevables, l'Autize nappe (UG14) et l'Autize superficielle (UG8).

II - Contexte du secteur des Autizes

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les différents éléments comme la météorologie, la géologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie, qui permettent de caractériser les particularités du secteur des Autizes, le fonctionnement de l'hydrosystème, et les relations entre les eaux superficielles et souterraines.

II - 1. Météorologie

L'analyse météorologique Safran⁴ est utilisée pour cette étude. Les résultats ont été pondérés sur les unités de gestion de l'Autize nappe et de l'Autize superficielle. Les moyennes mensuelles des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des températures sur la période 1958-2017 pour les deux unités de gestions sont représentées sur la figure ci-dessous.

On remarque des températures légèrement plus hautes pour l'Autize nappe, qui est située plus au Sud, et des précipitations plus importantes et mieux réparties sur l'année pour l'Autize superficielle, ainsi qu'un bilan hydrique climatique (P-ETP) nettement plus déficitaire au niveau de l'Autize nappe pour les mois de juin, juillet, août et septembre. En moyenne se sont 850 mm par ans qui précipitent sur le secteur de l'Autize superficielle et 700 au niveau de l'Autize nappe.

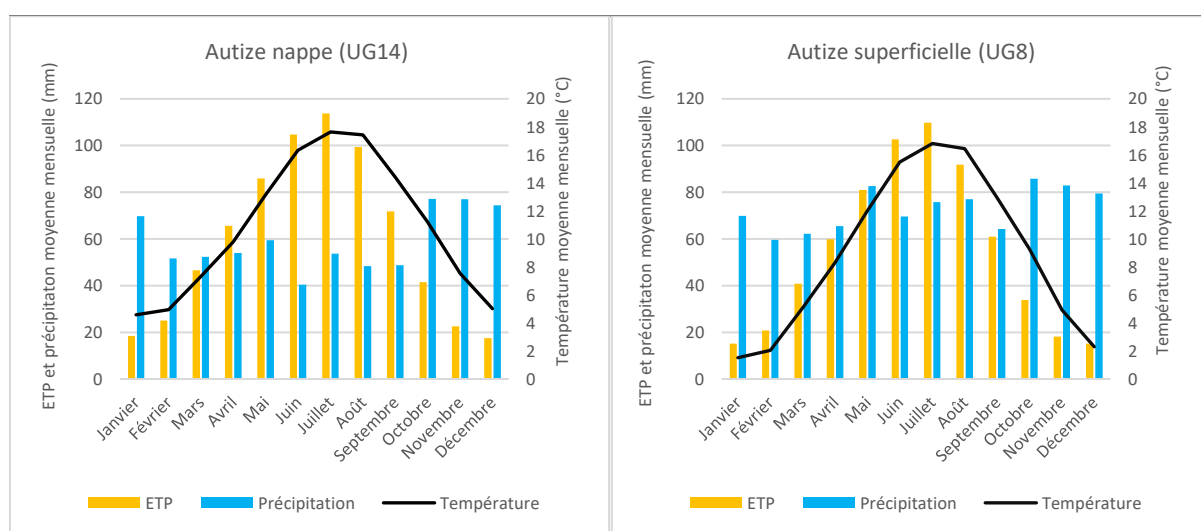


Figure 8: Température, précipitation et demande évaporative moyenne mensuelle sur les unités deux unités de gestion des Autizes (Données : Réanalyses Safran).

Sur la figure ci-dessous, nous pouvons apprécier l'évolution de l'évapotranspiration potentielle et des précipitations annuelles au cours des 60 dernières années. On remarque une importante variation interannuelle. On observe également que l'ETP est plus fréquemment supérieur aux précipitations sur le secteur de l'Autize nappe.

Un test non paramétrique de Man-Kendall a été appliqué aux séries temporelles. Pour l'évolution de l'ETP, les tendances sont significatives au seuil de 0,01 avec un tau de Kendall positif de 0,3 pour l'Autize superficielle et de 0,2 pour l'Autize nappe. Les tendances pour les précipitations ne sont pas significatives au seuil de 0.01.

⁴ Safran combine des observations de surface avec des données de sortie de modèles météorologiques pour interpoler un ensemble de paramètres au pas de temps horaires sur une grille composée de maille 8km de côté couvrant l'entièreté de la France (Quintana Sequi et al., 2008).

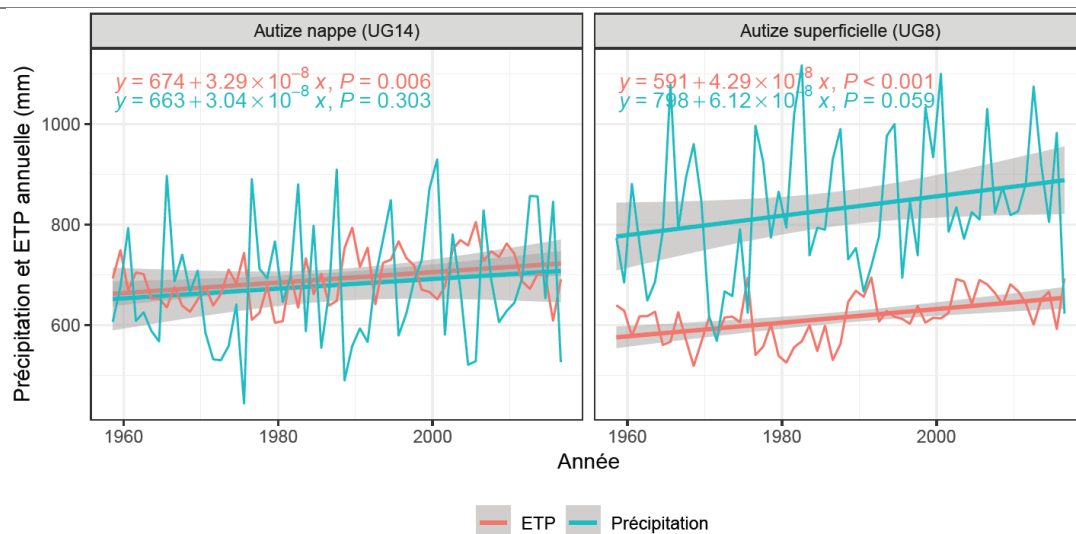


Figure 9 : Evolutions des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle annuelle sur les deux unités de gestions des Autizes (Données : Réanalyses Safran)

Comme illustré sur la figure ci-dessous, on observe des tendances à la hausse pour les températures sur les deux unités de gestions qui sont significatives au seuil de 0,01, avec des tau de Kendall positifs de l'ordre de 0,36. En ce qui concerne l'évolution de la pluie efficace sur la période hivernale, on n'observe pas de tendance. Enfin, pour le déficit climatique (P-ETP) sur la période estivale, s'il semble se démarquer une baisse, la tendance n'est pas significative (p-valeur de 0,3 et tau de Kendall de -0,1).

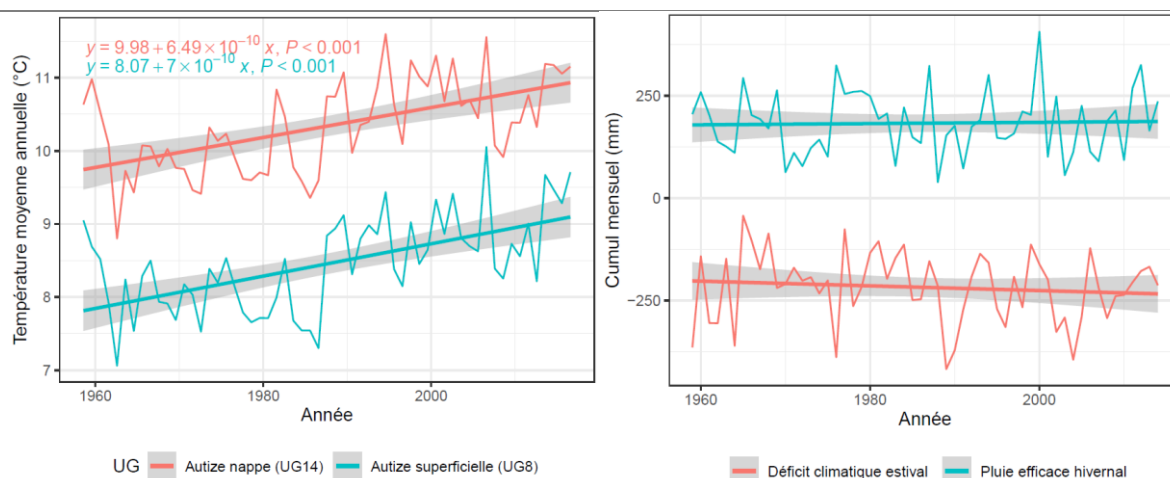


Figure 10 : Gauche : Evolutions des températures moyennes annuelles sur les deux unités de gestions des Autizes. Droites : Evolution du déficit hydrique climatique (P-ETP) sur la période estivale (mai à septembre) et évolution de la pluie efficace sur la période hivernale (novembre à mars) estimée par la méthode de Thornwhaite pour un sol de RU à 70mm sur l'UG Autize nappe (Données : Réanalyses Safran)

S'il on observe des tendances significatives à la hausse de l'ETP et des températures moyennes sur le secteur des Autizes, concernant les précipitations aucune tendance n'a pu être dégagée.

II - 2. Géologie de la plaine du Sud-Vendée

II - 2.1. Le Secondaire

Entre la fin du primaire et le début du secondaire, la région du Sud-Vendée est émergée, c'est la période de pénéplanation du socle armoricain. Cette pénéplaine est marquée par un bombement qui suit un axe E-W, ainsi la plaine du Sud-Vendée, qui est située au sud de cet axe, suit un pendage général d'orientation NNE-SSW (Roy, 1987). C'est cette pente ainsi que les nombreux accidents tectoniques formant une structure en « touche de piano » au niveau de la zone des secteurs de contact entre le socle et la plaine qui a favorisé l'avancée des transgressions marines et notamment des mers liasiques (Ibid).

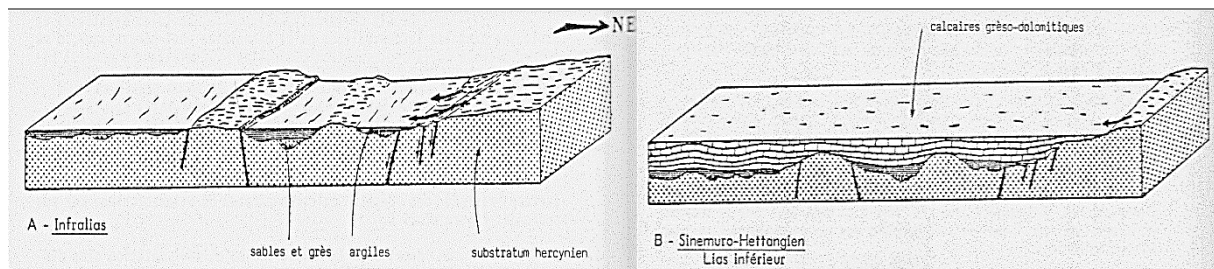


Figure 11: Blocs diagrammes figurant l'évolution de la plaine de Vendée depuis le Jurassique inférieur. A gauche : l'Infralias. A droite : le Lias inférieur (Roy, 1987).

Avant les premières transgressions marines, ce sont les dépôts du secondaire avec des argiles et des sédiments gréseux ou sableux de l'Infralias qui ont comblé en partie les vallées préliasiques avec des épaisseurs pouvant atteindre une vingtaine de mètre, essentiellement produit d'altération.

Ensuite, ce sont les transgressions de l'Hettangien et du Sinémurien qui prennent place. On ne retrouve pas de sédiments du Sinémurien, mais l'Hettangien a déposé des calcaires dolomitiques avec des variations importantes d'épaisseur et de nombreux îlots.

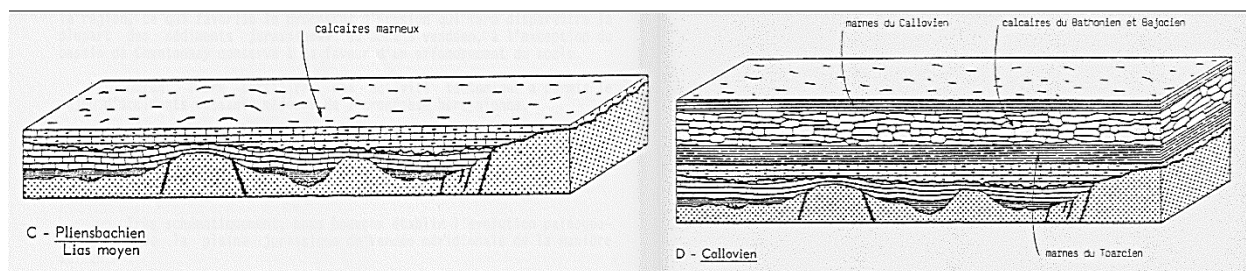


Figure 12: Blocs diagrammes figurant l'évolution de la plaine de Vendée depuis le Jurassique inférieur. A gauche : le Lias moyen. A droite : le Callovien (Roy, 1987). L'orientation Nord Est pointe à droite des figures.

Après une période d'émersion, le Pliensbachien est venu déposer des marnes et des calcaires argileux, dans les lesquelles on retrouve de nombreux oolites, au Pliensbachien supérieur la transgression est accentuée et les bassins Parisien et Aquitain communiquent de façon permanente (Ibid).

La transgression de l'Aaléno-Toarcien qui vient ensuite, a déposé une couche plus épaisse de marnes. Les faciès marneux du Toarcien ont eu une importance à la fois morphologique, en favorisant l'érosion, et hydrogéologique, en constituant une assise imperméable aux aquifères (Roy, 1987).

Les formations particulièrement calcaires du Bajocien et du Bathonien viennent ensuite se constituer jusqu'à la période callovo-oxfordienne, où est venue se déposer une épaisse couche de calcaires marneux (Ibid). C'est durant le Callovien que la mer était sans doute la plus profonde et au cours duquel la ligne de rivage a atteint son maximum au Nord (Ducloux et Nijs, 1972). Et ce n'est qu'après le Rauracien et le Séquanien durant lesquelles se sont des sédiments franchement calcaires qui se sont déposés, que la mer recule, et que la région tout entière émerge pour la première fois depuis le début du Jurassique (Ibid).

C'est au Crétacé inférieur, que le bombement axial EW a repris, en provoquant une émergence générale de la région qui a favorisé l'érosion de la majeure partie des strates du Jurassique qui s'étaient déposées sur le bocage vendéen (Roy, 1987).

C'est également durant le Crétacé inférieur qu'un rejeu des accidents cassants de l'orogénèse hercynienne a pris place à la suite d'activités tectoniques qui ont joué un rôle assez déterminant, comme l'illustre la figure ci-dessous (Ducloux et Nijs, 1972). Si les couches jurassiques se succèdent du Nord au Sud de la plaine de manière assez régulière, sur une large zone c'est un système d'anticlinaux et de synclinaux parallèles orientés WNW-ESE et accompagnés de failles et de flexures de même orientation, qui prend place (Ducloux et Nijs, 1972).

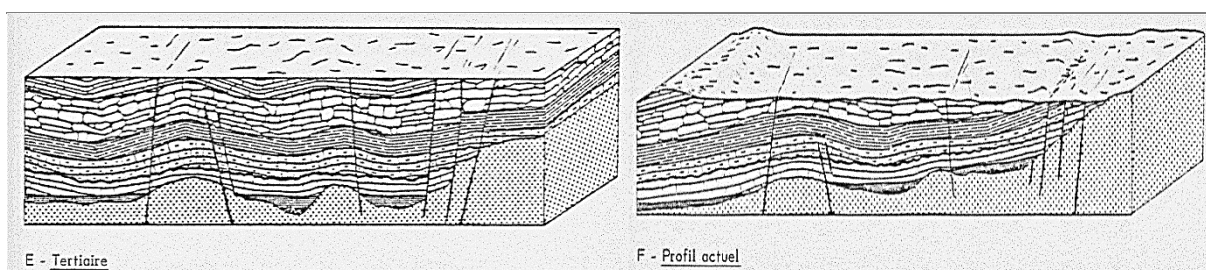


Figure 13: Blocs diagrammes figurant l'évolution de la plaine de Vendée depuis le Jurassique inférieur. A gauche : le Tertiaire. A droite : Profil actuel (Roy, 1987). L'orientation Nord Est pointe à droite des figures.

II - 2.2. Le tertiaire et le quaternaire

Durant les quelques 60 millions d'années du tertiaire, les transgressions n'ont jamais atteint le secteur et l'érosion était relativement peu active. A l'entrée de l'ère quaternaire, la région consistait en une plaine, dont la partie la plus déprimée correspondait aux affleurements des marnes callovo-oxfordiennes à une hauteur de 25 à 30 mètres (Ducloux et Nijs, 1972).

Le Pléistocène, en seulement 2 millions d'années, jouera un rôle déterminant pour la morphologie actuelle du Marais poitevin. Trois phases d'érosions se sont succédé, en suivant les phases glaciaires et interglaciaires. Les rivières se sont encaissées et les fonds des vallées se sont abaissés durant ces différentes phases. C'est également lors du Pléistocène que se démarque des terrasses composées de graviers du « pliocènes » ainsi que des îlots composés de « massifs » jurassiques qui ont résisté à l'érosion et que l'on retrouve actuellement dans le Marais poitevin (Ducloux et Nijs, 1972).

Durant cette période, de long processus de pédogenèse par décalcification – rubéfaction se sont mis en place et une épaisseur réduite de Loess (à texture sablo-limoneuse fortement calcaire) a pu recouvrir les flancs des vallées et les îles, pour être ensuite remaniée par solifluxion (Ducloux et Nijs, 1972). Ce Loess éolien ne se serait d'ailleurs formé que lors d'une troisième phase d'érosion lorsqu'une grande surface des marnes callovo-oxfordienne affleurerait et pouvait fournir les poussières nécessaires (Ibid). Ce qui a déterminé l'emplacement du Marais poitevin est donc cette vaste « gouttière d'érosion » au niveau de l'affleurement des marnes du callovo-oxfordien, qui rompt la continuité des plateaux calcaires de la plaine de Luçon-Niort et de l'Aunis (Ibid).

II - 3. Contexte hydrogéologique général

Le Marais poitevin repose sur la terminaison nord du Bassin aquitain dont les séries du Jurassique se sont déposées sur la bordure sud du Massif armoricain. La région est située juste à l'Ouest du seuil du Poitou qui la sépare du Bassin parisien. L'hydrogéologie du bassin versant qui alimente le Marais poitevin est globalement composée de trois grands types de formations.

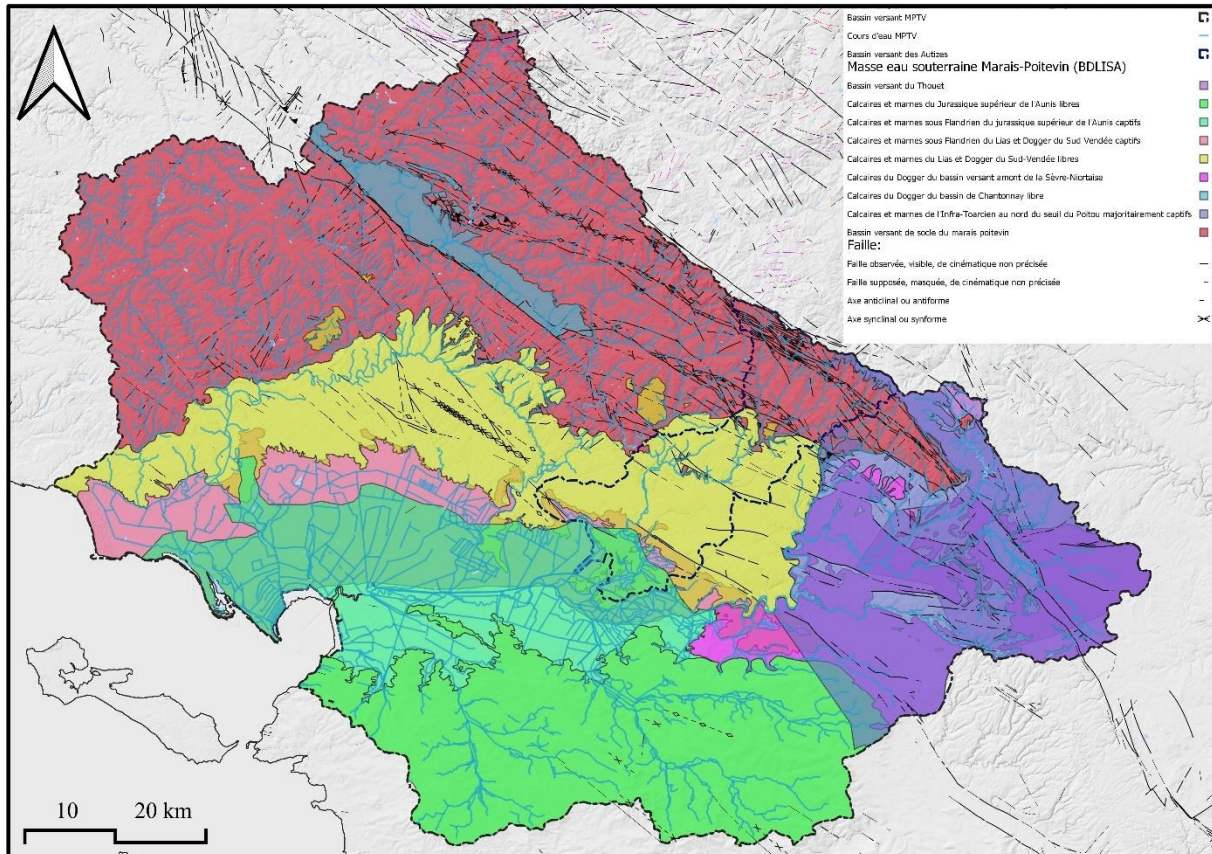


Figure 14: Localisation des masses d'eau souterraines du Marais poitevin (Données : Référentiel BDLISA)

Au nord, on retrouve le socle qui est composé de formations métamorphiques et magmatiques complexes, avec des conglomérats, des grès, des schistes ainsi que des quartzites et dolérites. Des nappes superficielles sont contenues dans des zones d'altérations superficielles. Le réseau hydrographique y est dense et particulièrement réactif aux précipitations avec une part importante de ruissellement. Les limites de bassin versant hydrographique et hydrogéologique correspondent.

Ensuite, se sont deux systèmes aquifères karstiques qui se sont déposés, les calcaires gréseux de l'Infra-Toarcien et les calcaires altérés et diaclasés du Dogger. L'Infra-Toarcien est essentiellement captif sous les formations marneuses du Lias moyen et supérieur, il affleure seulement sur environ 20 km² et sa qualité d'aquifère dépend du degré de fissuration et karstification. Le Dogger est affleurant sur une superficie d'environ 470 km² avant d'être recouvert par le Jurassique supérieur et le bri flandrien du Marais, il peut développer 40 mètres d'épaisseur par endroits (Roy, 1987). Les bassins versants topographiques et hydrogéologiques ne correspondent pas nécessairement et des transferts sont possibles d'un bassin à l'autre. Les fractures peuvent favoriser les phénomènes de karstification.

Enfin, le dernier grand type d'aquifère est représenté par le Jurassique supérieur qui est libre et affleurant au sud du Marais puis captif sous le bri. C'est exclusivement dans une frange superficielle fissurée et altérée que l'on retrouve des épaisseurs au caractère aquifère reposant sur le calcaire massif induré et ce uniquement dans les zones affleurantes.

II - 4. Hydrogéologie du secteur des Autizes

II - 4.1. Stratigraphie

La figure ci-dessous présente la stratigraphie, la lithologie et le caractère aquifère des différentes formations du secteur Est de la plaine du Sud-Vendée, du socle Hercynien au Jurassique supérieur, en passant par les différentes formations composant le Lias et le Dogger.

STRATIGRAPHIE	Epaisseur	Lithologie	Groupe géologique	HYDROGÉOLOGIE
MALM Oxfordien	Sup ^t (Rauracien)	20 à 30 m Marnocalcaires de Marans		Horizon perméable Nappe aquifère localisée
	Moy.	30 m Marnes à spongiaires (n'affleurent pas)		Horizon très peu perméable
	Inf ^r	10 m ? Marnes bleues ? (n'affleurent pas)		ECRAN
		10 m Alternance de Marnes et de Calcaire argileux		
DOGGER Callovien 70 à 80 m	Sup ^t 50 m	20 m Calcaire pseudonodulaire		Nappe aquifère localisée
		10 m Calcaires feuilletés		Horizon très peu perméable
		8 à 10 m Marnes bleutées et Calcaire argileux		
	Moy.	20 m Marnes grises avec minces intercalations de calcaire fin argileux		ECRAN
	Inf ^r	1,5 à 3 m Calcaire dur, argileux		Horizon perméable
	Sup ^t Bathonien 16 à 18 m	1 à 2 m Calcaire graveleux		
	Moy.	8 à 9 m Calcaire blanc		Horizon très perméable
	Inf ^r	7 m Calcaire graveleux		
LIAS 35 à 40 m		1 m Banc pourri : Marnocalcaire		Nappe aquifère importante
	Bajocien	9 à 20 m Calcaire blanc oolithique à fin		
	Sup ^r Aalénien	1 à 2 m Calcaire à oolites ferrugineuses		Horizon très peu perméable
	Toarcien	3 à 6 m Alternance de banc de Calcaire et de niveaux marneux		ECRAN
	Moy. Domérien	0 à 15 m Calcaire gréseux		Horizon peu perméable
INFRA-LIAS	Inf ^r Hettangien	2 à 15 m Calcaire oolithique caverneux		Horizon très perméable
		Schistes rouges ou grès grossiers		Nappe aquifère localisée à certains secteurs
SOCLE HERCYNIEN				Substratum peu perméable

Figure 15: Stratigraphie, lithologie et hydrogéologie du secteur Est de la plaine du Sud-Vendée (Bresson, 1977)

II - 4.2. Entités affleurantes et failles

Sur la carte ci-dessous, nous pouvons observer comment se répartissent les différentes formations géologiques qui affleurent sur le secteur des Autizes. On remarque que l'Infra-Toarcien et le Toarcien n'affleurent que sur des superficies très réduites, principalement au niveau des fonds de vallées creusées par l'Autize. De plus, l'épaisseur des calcaires du Sinémuro-Hettangien n'est que de plusieurs mètres sur ce secteur (Bresson, 1977).

Les Calcaires du Dogger affleurent sur une majeure partie du secteur des Autizes, on retrouve de l'amont à l'aval les formations du Bajocien, Bathonien et Callovien. Le Bathonien représentant l'horizon le plus perméable et aquifère.

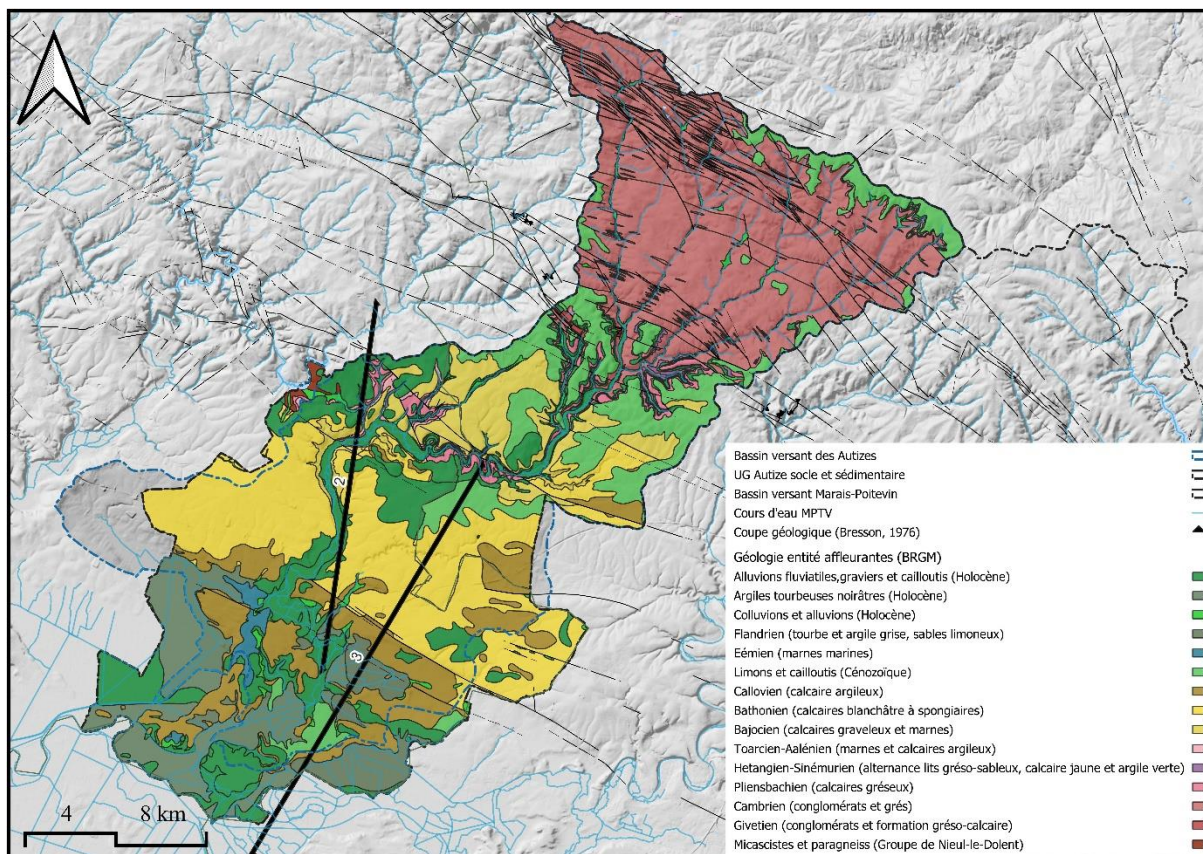


Figure 16 : Entités géologiques affleurantes et localisation des coupes géologiques sur le secteur de Autizes (Données : BRGM, Bresson (1976)).

Le secteur Est de la Vendée est affecté par une grande faille de direction N 65°W, avec un regard orienté SW, l'amplitude de son rejet est fort variable, elle est presque nulle vers l'Autize mais peut s'étaler sur une cinquantaine de mètre au niveau de Benet plus à l'Est (Roy, 1987).

Cette faille compartimente la nappe du Dogger, et on observe des fortes variations des niveaux piézométriques entre le compartiment élevé, formé par les calcaires bathoniens à l'état libre et le compartiment effondré qui passe à un état captif sous les formations du Callovien plus marneux et le bri argileux du Marais (Ducloux et Nijs, 1972 ; Roy, 1987).

C'est à la suite de la sédimentation jurassique, que les couches du Crétacé et du Tertiaires ont subi de nombreuses déformations tectoniques, qui ont donné à la plaine une structure en « touches de piano », formée par un ensemble de failles s'ordonnant selon un axe principal N-O – S-E et un second axe N-E – S-O (Roy, 1987). C'est lors de l'activité tectonique de l'ère tertiaire que s'est développé un réseau de fractures secondaires par le rejeu des accidents majeurs de l'orogénèse hercynienne, qui s'est ensuite karstifié, et qui définit aujourd'hui la productivité des nappes du Lias inférieur et du Dogger (Roy, 1987).

De manière générale, la tectonique a joué un rôle majeur au niveau de la dynamique hydrogéologique de la plaine et a déterminé la productivité des différents secteurs⁵.

⁵ Afin d'illustrer le caractère karstique des aquifères de la plaine et l'importance majeur des axes de fracturations d'axe NW-SE sur la dynamique des eaux souterraines un évènement particulier sur lequel Roy a pu travailler est étayé en annexe (au point 2).

II - 4.3. Coupes géologiques

Deux coupes⁶ ont été levées sur le secteur Est de la plaine du Sud-Vendée, sur le bassin versant des Autizes, par Bresson en 1977, en se basant sur les données des forages qui étaient alors disponibles. L'auteur a précisé pour les deux coupes le toit de la nappe libre en période hivernale et en période d'étiage, ainsi que le caractère saturé des calcaires.

Sur la coupe n°3 ci-dessous, On remarque que les couches du Bathonien et du Bajocien qui composent l'essentiel de la nappe du Dogger deviennent captives à partir du sud de la faille de bordure du Marais poitevin.

On distingue également un fossé d'effondrement, (le graben de Massigny), bordé de deux horsts entre St-Pompain et Oulmes. Avec une zone en aval d'Oulmes, qui présente des épaisseurs de Bathonien/Bajocien saturées importante, ce sont les principaux secteurs aquifères exploitables, selon Bresson (1977), le reste de la nappe libre du Dogger présentant des débits faibles et ponctuels.

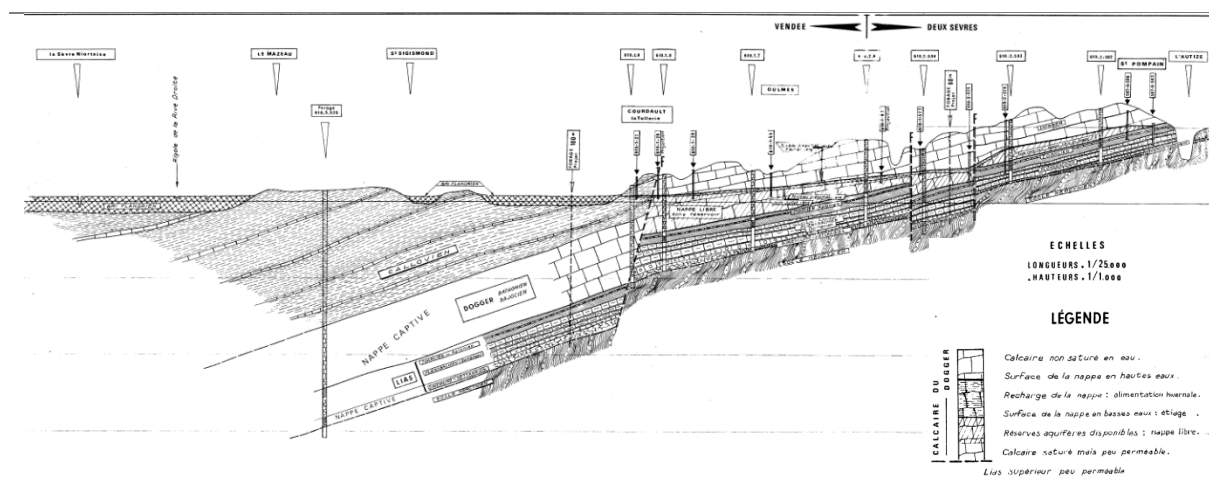


Figure 17: Coupe n°3 secteurs EST plaine Vendéenne (Bresson, 1977).

Sur deuxième coupe représentée ci-dessous, on peut distinguer des zones en amont de St-Hilaire-des-Loges, où des épaisseurs de Lias sont perchées au-dessus des terrains de socles hercyniens. Plus en aval, le Lias s'enfonce sous le Dogger affleurant avec un net pendage vers le sud, et ce n'est qu'à partir de Nieul sur l'Autize, qu'on retrouve une zone de plaine comportant des couches saturées exploitables du Bathonien/Bajocien qui sont limitées au sud par la grande faille de bordure du Marais (Bresson, 1977).

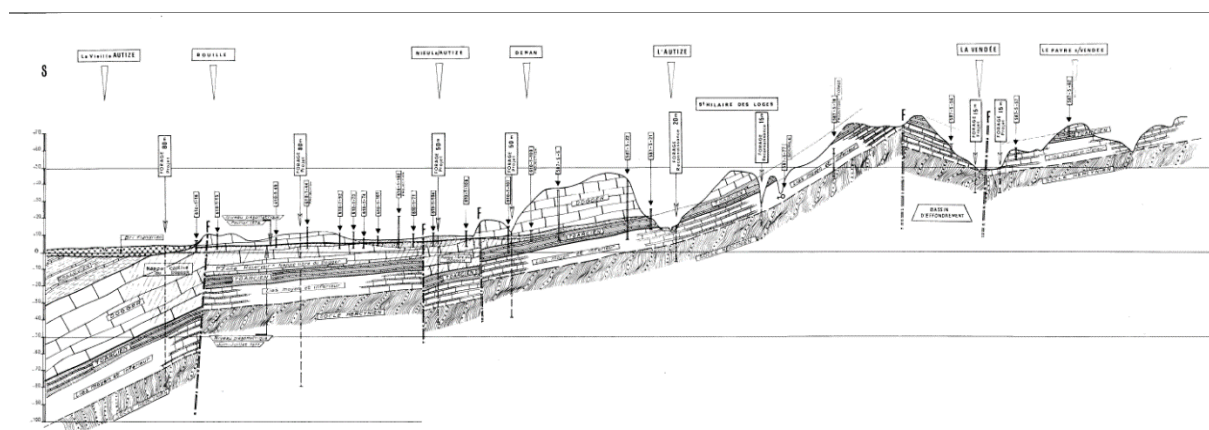


Figure 18: Coupe n°2 Sud-Nord secteur Est plaine Vendéenne (Bresson, 1977).

Au Sud de la grande faille de Benêt on retrouve une structure monoclinale, avec les couches du Bathonien/Bajocien et du Lias qui se prolongent avec un net pendage, d'orientation SW, sous le Marais

⁶ Le tracé des deux coupes est représenté sur la Figure 16 ci-dessus.

et la formation marneuse du Callovien. Globalement, le secteur est composé d'une série de failles NW-SE ainsi que de failles NE-SW, qui donnent à l'ensemble une structure en damier avec des parties effondrées et des parties surélevées (Roy, 1987).

II - 4.4. Hydrodynamique

II - 4.4.1. Lias

Selon Roy (1987) et Bresson (1977) il existe des phénomènes de drainance verticale descendante des horizons perméables et semi-perméables du Dogger, Toarcien et Pliensbachien vers le Lias inférieur, notamment pour les secteurs où le Dogger développe une puissance de plus de 5m. En période de hautes eaux les deux formations montrent d'ailleurs une nette tendance à l'équilibre des pressions (Roy, 1987). Les différences de charge entre les horizons semi-perméables et l'aquifère sous-jacent, peuvent engendrer des échanges assez importants, qui peuvent être favorisées notamment par des réseaux de cassures et des pompages prolongés dans la nappe du Lias inférieur, l'alimentation du Lias inférieur dépend donc assez directement du Dogger (Roy, 1987).

II - 4.4.2. Dogger

La nappe libre du Dogger et plus précisément les formations particulièrement perméables sont alimentées par infiltration directe de la pluviométrie efficace, avec des temps de réactions aux pluies qui peuvent être très rapides. Des porosités efficaces de l'ordre de 3 à 9 % ont été estimées pour l'aquifère du Dogger de la plaine du Sud-Vendée (Roy, 1987). Au niveau du temps de transfert, des valeurs de l'ordre de 40 m/an sont estimées dans des zones productives notamment en bordure de Marais où calcaires du Dogger se saturent et le gradient hydraulique devient très faible, ce sont des valeurs qui peuvent augmenter fortement en fonction des gradients hydrauliques, notamment dans les zones moins productives, mais aussi en fonction du degré de fissurations et des écoulements préférentiels⁷ (Roy, 1987).

C'est dans une zone limitrophe au Marais d'une largeur de 2 à 3 km que l'aquifère est réellement productif, où l'on retrouve 10 à 15 m saturé des calcaires bathoniens « en plaquettes » avec une transmissivité très élevée. Au-delà de cette limite on peut retrouver ponctuellement des points de prélèvement productifs là où c'est formé une tranche d'eau suffisante et où s'est développée une karstification (Roy, 1987).

II - 4.4.3. Bri

Dans sa thèse sur les comportements et évolution physique des sols de Marais, Bernard (2006) a pu identifier dans le Marais poitevin trois niveaux de Bri différents entre la surface du sol et le toit du substratum : le Bri supérieur (consolidation de surface), le Bri inférieur (plastique à pseudo-liquide), et le Bri profond qui est consolidé par la pression litho statique. Bernard (2006) précise que la partie profonde du Bri devient quasiment imperméable lorsqu'il possède une épaisseur suffisante pour densifier la partie située au niveau de la surface d'échange avec le substrat calcaire, ce que l'on retrouve en général au niveau des Marais desséchés. Mais en périphérie, au niveau des Marais mouillés, l'auteur souligne que la nappe devient commune entre le bri et le calcaire, avec des échanges rapides et importants, car les formations calcaires recoupent avec les niveaux inférieurs et perméables du Bri (Bernard, 2006).

⁷ A titre d'illustration, des diagraphies optiques de la formation du Dogger réalisées sur le site H+ de Poitiers (à l'Est de la région) sont présentées en annexe (au point 1).

II - 4.5. Piézométrie

II - 4.5.1. Carte piézométrique

Bresson (1977) a dressé une carte piézométrique d'étiage et de hautes eaux du secteur Est de la plaine du Sud Vendée en relevant les niveaux d'eaux dans les puits et forages de la région, en février 1976 et juin/juillet 1975 (i.e. à une époque où l'irrigation était encore peu développée). Les cartes sont représentées sur la figure ci-dessous avec un zoom sur le cours inférieur de l'Autize.

On peut constater que l'Autize draine la nappe en situation de hautes eaux (à gauche), avec une légère inflexion concave des isohypses au niveau du cours de l'Autize. En période d'étiage au contraire, en aval de Nieul-sur-l'Autize les isohypses forment une inflexion convexe à l'intersection avec l'Autize, ce qui semble indiquer un apport de l'Autize à la nappe. A l'Est, il existe entre la vallée de l'Autize et Niort, une crête piézométrique dans la nappe du Dogger qui sépare les écoulements (Roy, 1987).

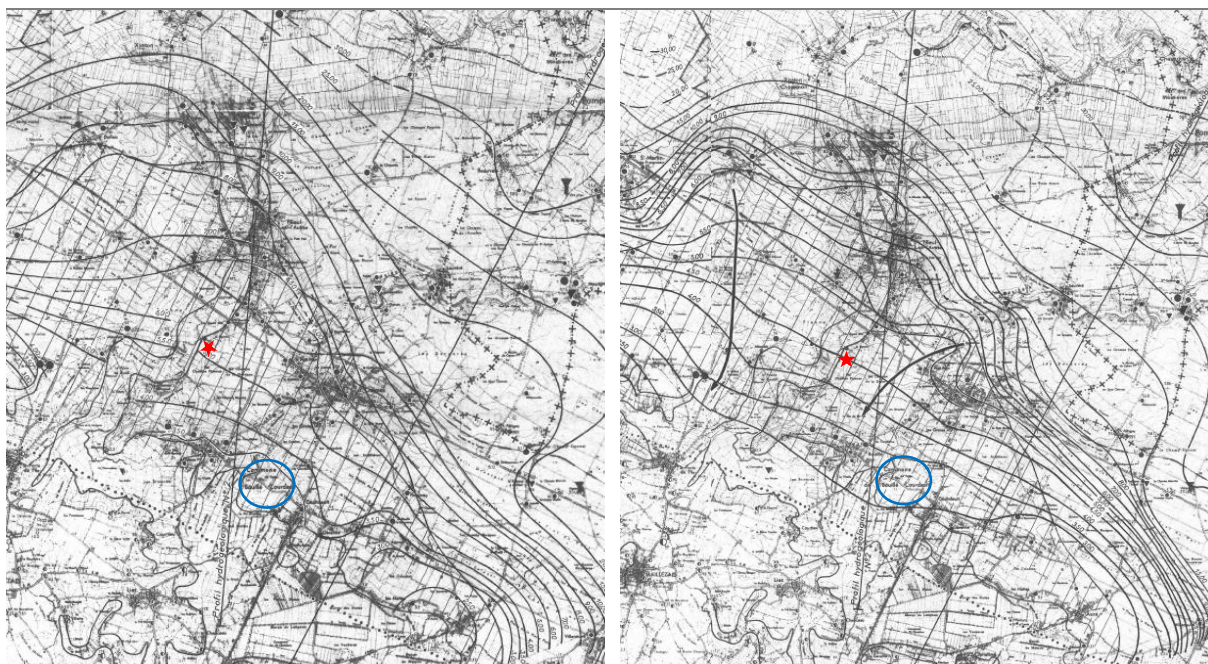


Figure 19: Zoom sur le cours inférieur de l'Autize sur les cartes piézométriques dressé par Bresson (1977). Gauche : Février 1976. Droite : juin/juillet 1975. La localisation du piézomètre du Grand-Nati (Oulmes) est indiquée par l'étoile rouge et le secteur de Bouillé-Courdault par un cercle bleu (Bresson, 1977).

En bordure du Marais mouillé, dans la région de Bouillé-Courdault (entourée par un cercle bleu sur la carte), on observe peu de variations entre les deux périodes, les niveaux piézométriques sont de 3,5 m. NGF en période d'étiage et en période hivernale. Au niveau de l'emplacement du piézomètre du Grand-Nati, sur la commune d'Oulmes (étoile rouge sur la carte), on observe également assez peu de variations entre la période d'étiage (proche de l'isohypse 4,5 m. NGF) et la période de hautes eaux (proche de l'isohypse 5 m. NGF).

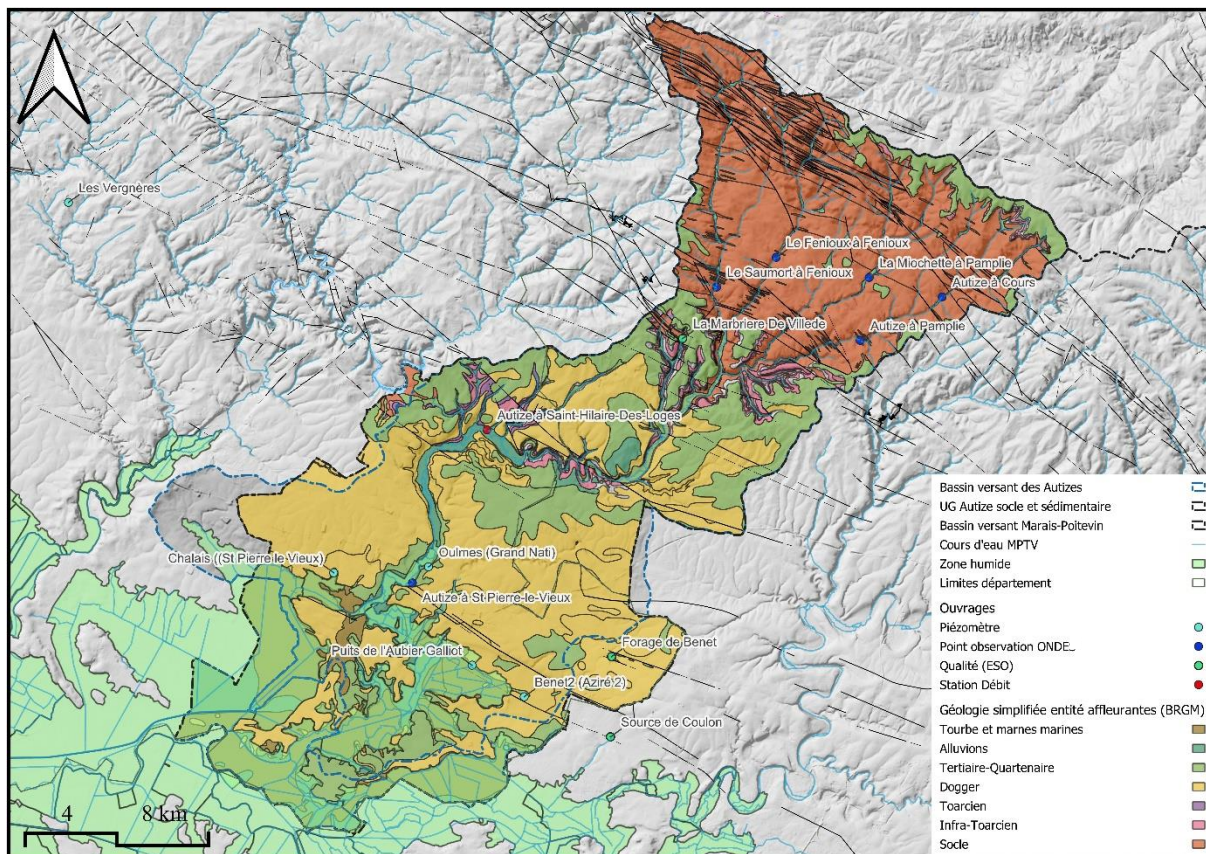
Au cours de la saison d'étiage, une partie de l'aquifère du Dogger se dénoie par écoulement latéral vers le sud ainsi les zones concernées en premier sont celles situées dans la partie Nord, et au niveau des horsts (blocs surélevés par la tectonique), alors que les grabens bénéficient d'une tranche d'eau supérieure (Roy, 1987).

En période de hautes eaux, la grande perméabilité et large surface d'affleurement de la nappe libre du Dogger permet une réalimentation rapide par les eaux d'infiltration, ainsi les zones noyées remontent progressivement vers le Nord. Le gradient de la pente de la surface piézométrique est uniforme jusqu'à une cote de +10mNGF où il décroît en direction du Marais, et la surface piézométrique se trouve à une

altitude supérieure à celle du Marais ce qui permet à une ligne NO-SE de sources de débordement d'alimenter les canaux du Marais (Roy, 1987).

II - 4.5.2. Ouvrages et piézomètres

La localisation des piézomètres du secteur des Autizes est représentée sur la carte ci-dessous, tous sont situés sur la plaine en périphérie direct du Marais poitevin et liés à la masse d'eau des calcaires et marnes du Lias et Dogger du Sud-Vendée libres. On retrouve également sur la figure, la station de mesure de débit de Saint-Hilaire-des-Loges, les points d'observation du réseau ONDE, et les points de mesures de la qualité des eaux souterraines.



Les niveaux piézométriques du piézomètre du Grand-Nati sont relevés depuis 1987 (i.e. postérieur au développement de l'irrigation sur le secteur). Comme on peut le voir sur le log de forage reconstitué ci-dessous, les principales venues d'eaux se font entre 8 et 20 m de profondeur, ce qui correspond à l'épaisseur du Bathonien fracturé à cet endroit.

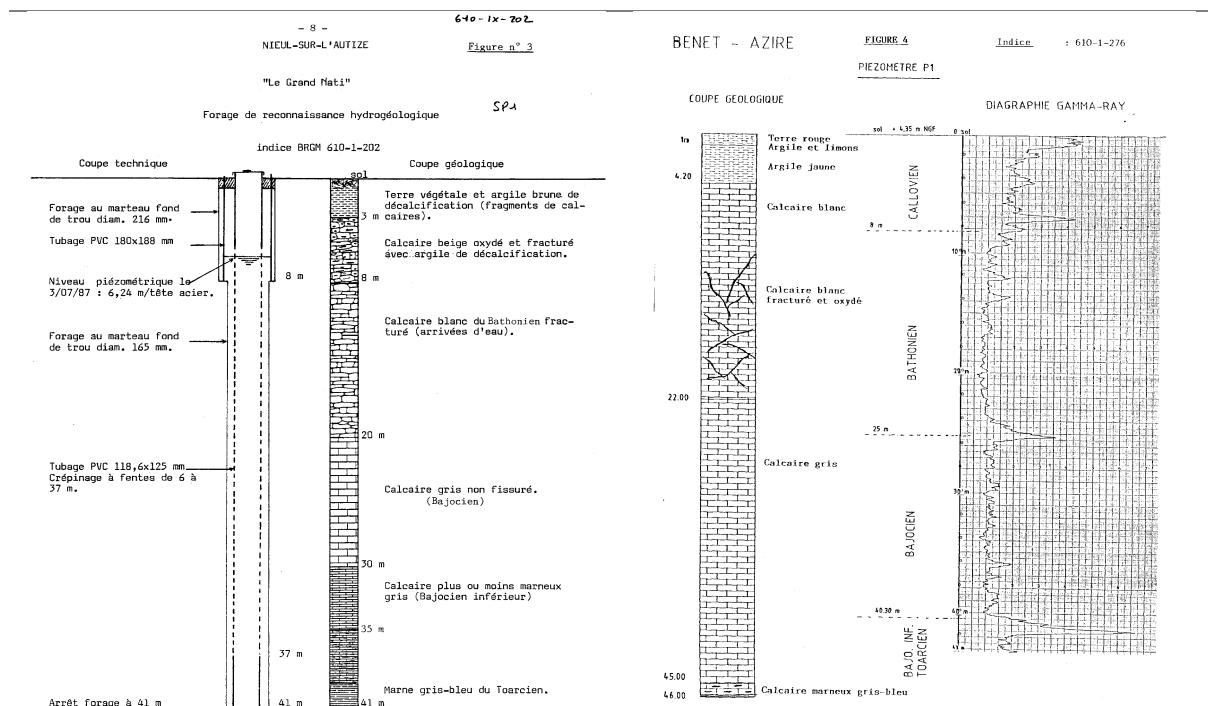


Figure 21 : A gauche : Coupe technique et géologique du forage du Grand-Nati. A droite : Coupe géologique et diagraphie Gamma-Ray du forage du Grand-Nati (Info-Terre).

A l'extrémité Est des Marais mouillés de la Vielle Autize, on retrouve le piézomètre d'Aziré, qui enregistre les niveaux de la nappe du Dogger sous les calcaires argileux du Callovien depuis 1990. Des transmissivités de l'ordre de 250 m²/h y ont été calculées par essais de pompages (InfoTerre).

Le piézomètre de Chalais situé à Saint-Pierre-le-Vieux enregistre les niveaux piézométriques depuis 1989, il est situé tout à l'Ouest, à proximité direct des Marais mouillés dépendants du canal de la Jeune Autize.

Depuis 2010, la coordination de défense du Marais poitevin, a mis en place un suivi télémétrique du niveau piézométrique au droit du Puits de l'Aubier Galliot à proximité direct du Marais mouillé de la vielle Autize dans le secteur de Bouillé-Courdault. Les chroniques oscillent entre 2.25 et 4 m. NGF en période de hautes eaux et entre 1.75 et 2.25 m. NGF en période estivale depuis 2011. Nous pouvons noter à ce propos, que les niveaux estivaux étaient de l'ordre de 3,5 m. NGF dans ce secteur sur la carte piézométrique tracée par Bresson en 1977. Un limnigraphe a également été installé à 250m du puits (sur le bief de Saint-Arnault attaché au marais des Nattes).

II - 4.5.3. Chroniques piézométriques

La figure ci-dessous présente les chroniques des piézomètres du secteur des Autizes. On observe des cycles annuels relativement synchrone pour les trois piézomètres avec des amplitudes de battement assez différentes et des décalages pour les cotes minimales et maximales. C'est au niveau du piézomètre du Grand-Nati (à Oulmes) que l'on peut observer les plus grandes variations de hauteurs piézométriques, avec près de 8m NGF d'amplitude et pour celui de St-Pierre les cotes les plus basses, qui ont pu dépasser plusieurs fois 2m. en dessous de la cote de 0m. NGF (niveau de la mer).

Au piézomètre du Grand-Nati (Oulmes) les variations journalières peuvent être importantes, ainsi on a pu observer une remontée de +1m. (entre le 14 et le 15 octobre 2012), les baisses journalières les plus importantes concernent la période hivernale (jusque -0.5 m).

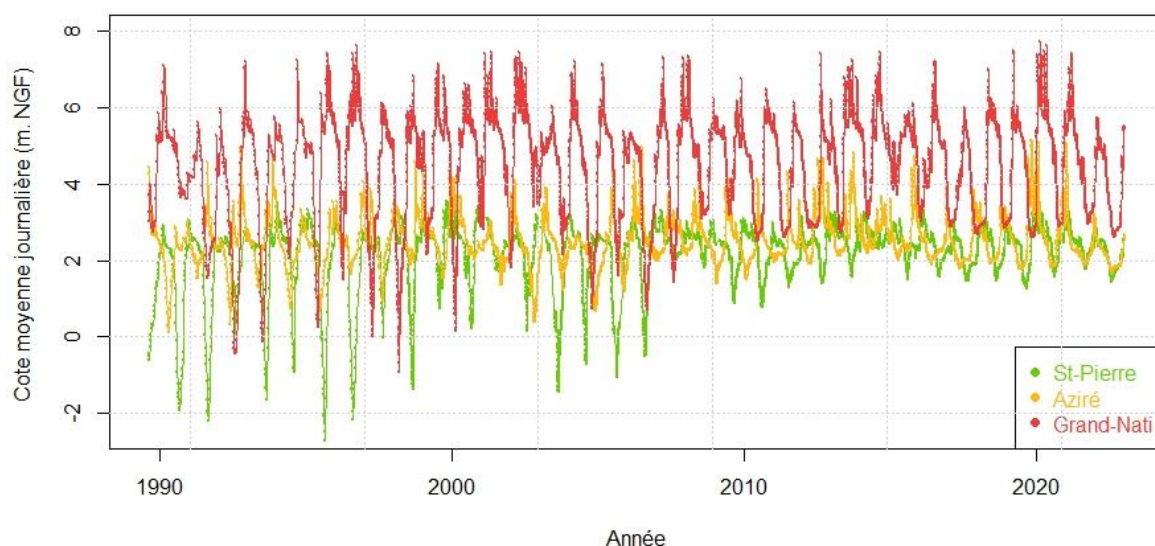


Figure 22: Chroniques piézométriques sur le secteur des Autizes (Données : ADES)

On remarque globalement ce qui semble être l'impact de prélèvements très importants, avec des chutes sous le niveau de 0m. NGF jusque dans les années 2005-2007. Ensuite on observe une nette remontée des niveaux minimums, et des amplitudes de battements moins importantes.

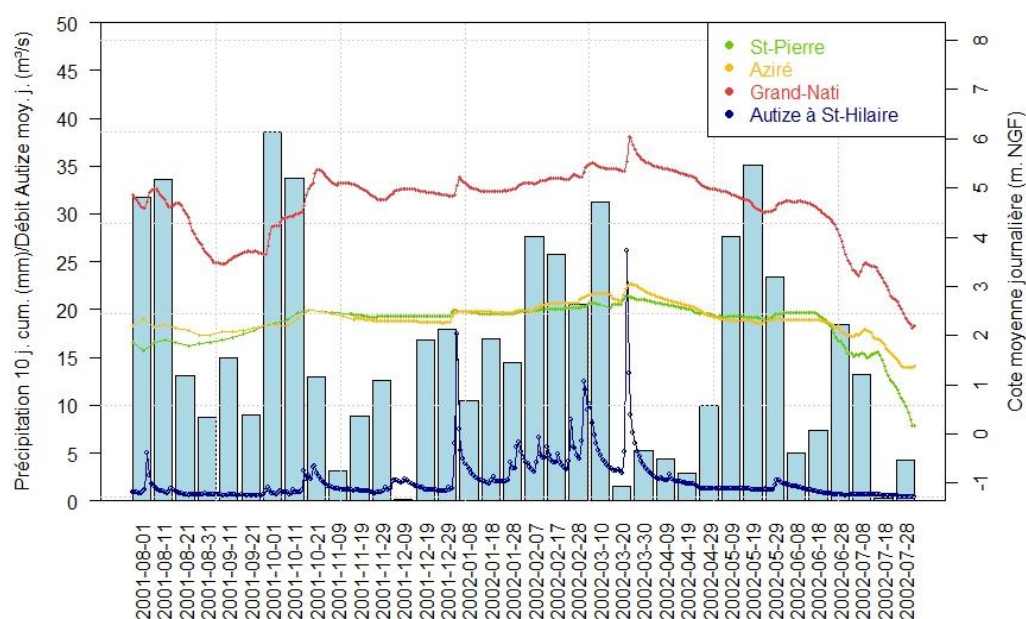


Figure 23: Evolution des niveaux piézométriques journaliers, du débit journalier de l'Autize et des précipitations décennales (bâtonnets bleus) pour l'année hydrologique 2001-2002 (Données : HydroPortail, ADES et réanalyses Safran).

La figure ci-dessus présente les variations journalières des niveaux piézométriques des trois principaux piézomètres et des débits journaliers de l'Autize à St-Hilaire-des-Loges en parallèle aux précipitations décennales. On remarque qu'à la sortie de l'été, ce sont 65 mm cumulés sur 30 jours qui font réagir fortement le piézomètre du Grand-Nati, avec une remontée nette de plus de 50 cm sur trois jours, à la fin du mois de septembre.

Entre septembre et fin décembre on observe que les pluies même importantes ne génèrent pas de variations de débit importantes sur la partie plus amont du bassin versant sur les socles, mais l'on observe une recharge des aquifères sur la partie sédimentaire. Enfin, il semble y avoir une relation plus directe et synchrone entre les variations de débits et les variations de hauteur du piézomètre du Grand-

Nati qu'avec les autres piézomètres, ce qui est cohérent avec la proximité entre ce piézomètre et le lit de l'Autize (une centaine de mètre).

II - 5. Hydrologie

L'Autize, s'écoule, pour plus de la moitié de son bassin versant, sur le socle hercynien, avec un réseau hydrographique très dense sur l'amont de son bassin versant (cf. Figure 20). Ensuite elle suit son cours sur des formations sédimentaires du Jurassique inférieur et moyen, et va ensuite se diviser entre la Vieille Autize et le canal de la jeune Autize au niveau des Marais mouillés du Marais poitevin. L'Autize a un régime typiquement pluvial.

Avant de trouver son exutoire actuel, l'Autize s'écoulait historiquement vers l'ouest, comme affluent rive gauche de la Vendée. C'est par un phénomène de capture par érosion régressive, qui a été daté à l'inter glaciation Mindel-Riss, d'une rivière s'écoulant vers le sud, qu'elle rejoint maintenant la Sèvre-Niortaise dans le Marais mouillé (Bresson, 1977 ; Ducloux et Nijs, 1972)⁸.

Plus de 1035 plans d'eaux ont été dénombré sur le bassin versant de l'Autize, en particulier sur la tête de bassin versant, principalement sur l'amont des bassins versants du Saumort, et du ruisseau de Fenioux, ces réserves sont généralement situées en travers de cours d'eau temporaire, ou remplie par une dérivation. Elles développeraient une surface totale d'environ 1.1 km² (soit près de 0.45 % de la surface totale du bassin versant topographique (Compère et Thinon-Larminach, 2021). Ainsi, en période hivernale, de nombreuses réserves collinaires principalement destinées à l'irrigation se remplissent, et modifient l'hydrologie notamment pendant leur période de remplissage, avec un écrêtage des crues et en limitant le débit à l'exutoire au débit réservé.

II - 5.1. Stations de débit

La station de St-Hilaire-des-Loges dispose de données de débits moyens journaliers depuis 1971, l'Autize en ce point draine un bassin versant de 243,93 km², son module annuel est de 2.67 m³/s.

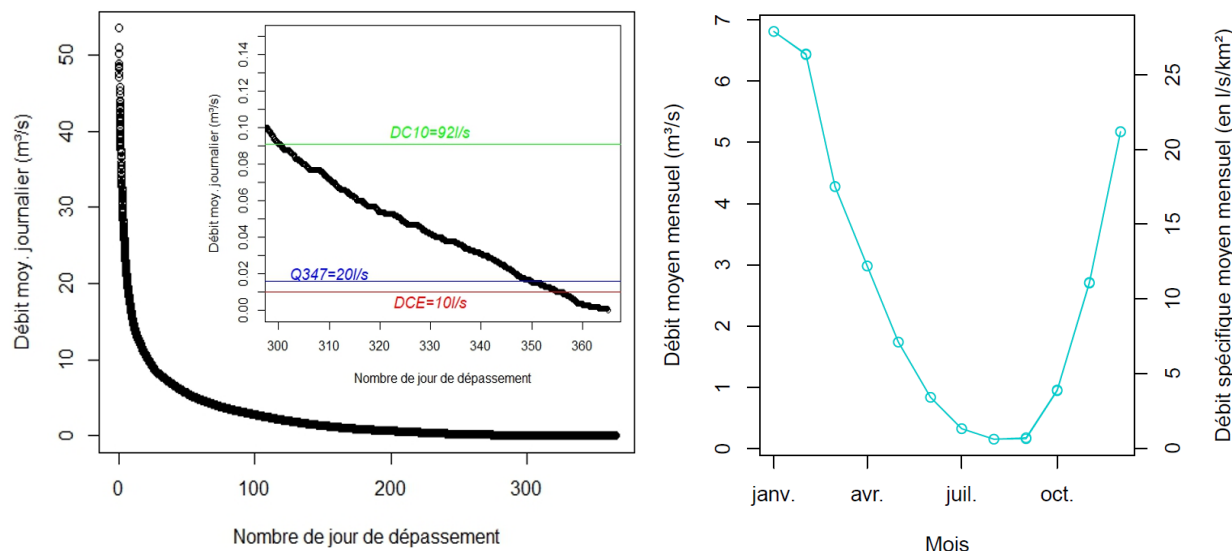


Figure 24: Gauche : Courbe des débits classés de l'Autize à St-Hilaire-des-Loges (1971-2022), Droite : Débit moyen mensuel et débit spécifique moyen mensuel de l'Autize à St-Hilaire-des-Loges (1971-2022) (Données : HydroPortail).

⁸ Le phénomène aurait été favorisé par un large synclinal, dont le noyau composé de marnes calloviennes (plus tendre) a pu faciliter l'érosion régressive de l'affluent jusqu'à recouper le cours de l'Autize au niveau de Saint-Hilaire-des-Loges (Ducloux et Nijs, 1972).

Sur la figure ci-dessus, la courbe des débits classés est représentée, ainsi que les débits moyens mensuel de l'Autize enregistrés à la station de St-Hilaire-des-Loges.

Plusieurs débits spécifiques sont utilisés pour caractériser différents débits d'étiage :

- DCE (débit dépassé en moyenne 355 jours par an) = 0.01 m³/s
- DC10 (débit journalier dépassé en moyenne 10 mois par an/300jours par ans) = 0.091 m³/s
- Q347⁹ (ou Q95%) : débit atteint ou dépassé, en moyenne, pendant 347 jours par an (soit 95% du temps) = 0.02 m³/s

Période	Cinquantennale (sèche)	Quinquennale (sèche)	Biennale (sèche)	Biennale (humide)	Quinquennale (humide)	Cinquantennale (humide)
Mensuel (m ³ /s)	0,003	0,014	0,042	29,9	29,9	65,8
Journalier (m ³ /s)	0,001	0,007	0,022	43,4	57,6	87,5

Tableau 1: Débit caractéristique d'étiage et de crue de l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges (source : HydroPortail).

Sur la figure ci-dessous on peut observer l'évolution des débits moyens mensuels hivernaux et estivaux de l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges depuis 1972. On peut noter que l'étiage de 2022 est le deuxième le plus sévère jamais enregistré, avec moins de 13 l/s enregistrés en moyenne à la station sur les trois mois d'été, derrière 1976 où seulement 5 l/s ont été enregistrés en moyenne.

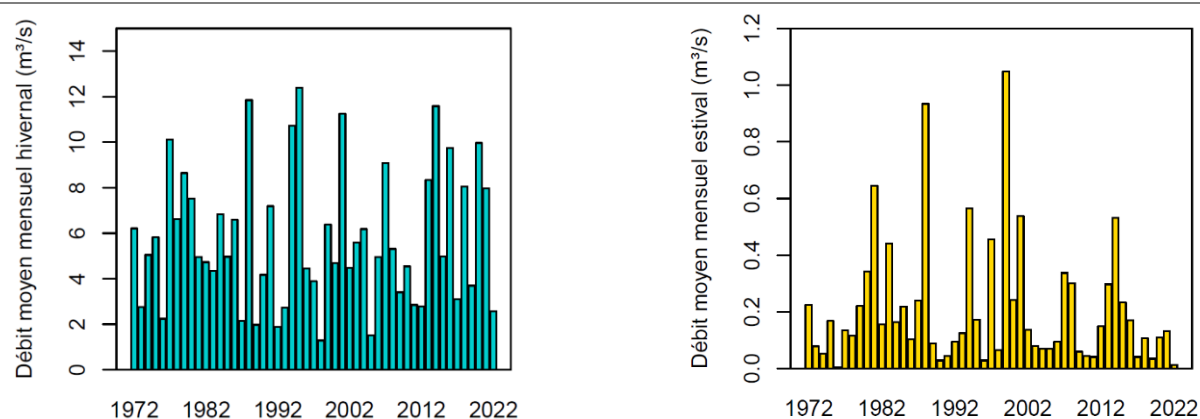


Figure 25: Gauche : Débit moyen mensuel de l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges pour les mois de janvier, février et mars depuis 1972. Droite : Débit moyen mensuel l'Autize à Saint Hilaire-des-Loges pour les mois de juillet, août et septembre depuis 1972 (Données : HydroPortail).

On peut observer sur la figure ci-dessous la quantité de précipitation nécessaire à la sortie de l'été 2010 avant que des débits importants soient enregistrés à la station de St-Hilaire-des-Loges. On remarque que c'est seulement à partir de début décembre que des débits conséquents sont enregistrés, ils restent proche de 0 jusqu'à début novembre. On observe ensuite peu de décalage des débits aux précipitations jusqu'au début mars.

⁹ : C'est le débit à partir duquel est quantifié les débits résiduels obligatoires pour les prélèvements directs en rivière en Suisse.

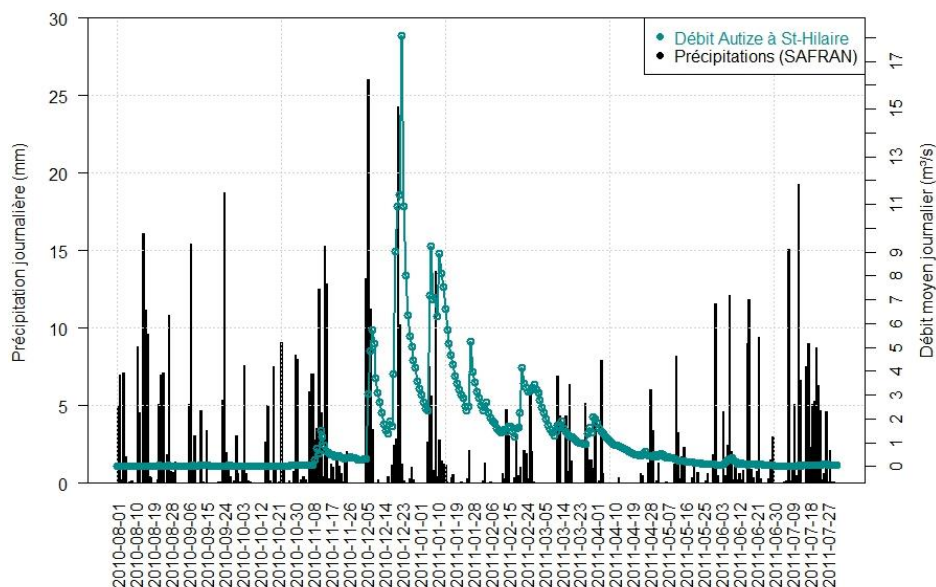


Figure 26: Débit de l'Autize à Saint-Hilaire des Loges et précipitations pondérées sur l'UG Autize Socle pour l'année hydrologique 2010-2011 (Données : HydroPortail, réanalyses Safran).

II - 6. Qualité et faciès hydrochimiques des eaux souterraines et de surfaces

Sur le bassin versant des Autizes, on retrouve plusieurs points de suivis de la qualité des eaux de surface et deux points de suivis de la qualité des eaux souterraines, avec un troisième, situé tout juste en dehors du bassin versant, ils témoignent de la qualité des trois principales masses d'eaux souterraines du secteur.

Le point de la Marbrière, est rattaché à la masse d'eau, « Bassin versant de socle du Marais poitevin », le forage de Benet capte la nappe captive de l'Infra-Toarcien, pour l'alimentation en eau potable (AEP) et des usages domestique depuis 1900, il est situé au sud-est du bassin versant de l'Autize. Seulement 3 km plus au sud on retrouve les sources de Coulon, une résurgence aménagée en captage qui est rattachée à la masse d'eau des Calcaires et marnes du Lias et Dogger du Sud-Vendée libres.

Comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessous les eaux souterraines sont bicarbonatées calciques et magnésienne. Les eaux du Lias représentées ici par le point de Benet, ont une dureté totale (somme des ions Ca^{++} et Mg^{++}) et une teneur en magnésium généralement plus importante que le Dogger et des teneurs en nitrates moins importante grâce au toit relativement peu perméable du Toarcien (Roy, 1987). Les eaux de surfaces sont moins bicarbonatées, et on peut noter une différence amont-aval, avec des eaux plus Chlorurées et moins calciques en aval au niveau de la Jeune Autize à St-Pierre qu'en amont au niveau de l'Autize à Xaintray.

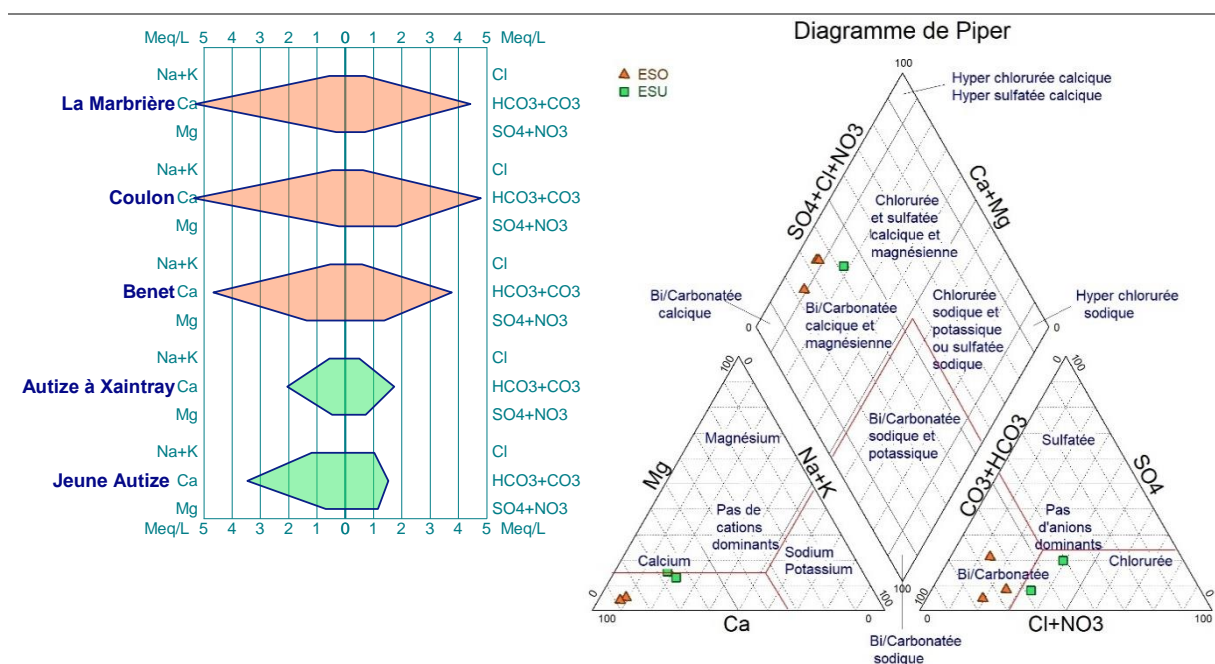


Figure 27: Diagramme de Stiff et Piper, qualité eaux superficielles et souterraines sur le secteur des Autizes (Données : Naïades, ADES).

Sur la figure ci-dessous, nous pouvons noter que les concentrations en nitrates ont globalement augmentées depuis 2007, passant d'environ de 70 à 80 mg/l au captage des sources de Coulon. Pour la Marbrière on observe une tendance continue à la baisse des concentrations en nitrates, de 30-35mg/l en 1993 vers 20-25 mg/l en 2016, avec un maximum de 37 mg/l. Au forage de Benet, on retrouve des valeurs maximums de nitrates de 85 mg/l et une moyenne de 11 mg/l. L'eau du piézomètre de St-Pierre le Vieux a été analysée lors du forage en 1989, on y retrouvait déjà 61.8 mg/l de NO₃ (BSS, InfoTerre).

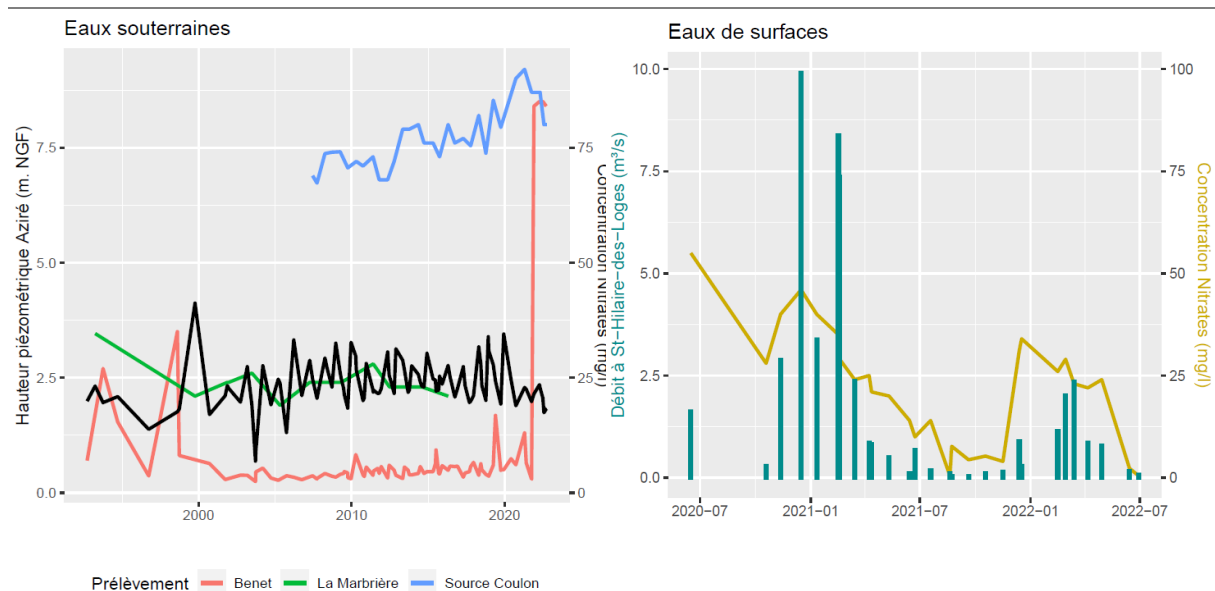


Figure 28: Gauche : Evolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines du secteur des Autizes en relation avec les fluctuations des cotes piézométrique à Aziré (courbe noire). Droite : Evolution des teneurs en nitrates de l'Autize à St-Hilaire en fonction en relation avec les débits enregistrés à St-Hilaire (bâtonnets bleus). (Données : ADES, HydroPortail et Naïades).

Le tableau ci-dessous décrit l'état quantitatif et qualitatif des masses d'eau du bassin versant de socle et des calcaires et marnes du Lias et Dogger du Sud-Vendée libres ainsi que les tendances significatives

et durables à la hausse, tel que repris dans le SDAGE du bassin Loire Bretagne (2 correspond à bon état et 3 à un état médiocre).

Période de référence	Code européen de la masse d'eau	Nom de la masse d'eau	Etat Nitrate	Etat Pesticides	Etat chimique de la masse d'eau	Paramètre(s) déclassant(s) de l'état chimique	Etat quantitatif de la masse d'eau	Tendance significative et durable à la hausse
2014 à 2019	FRGG030	Bassin versant de socle du Marais poitevin	2	3	3	Pesticides (QG)	2	
2014 à 2019	FRGG042	Calcaires et marnes du Lias et Dogger du Sud-Vendée libres	3	3	3	Nitrates (QG, AEP), pesticides (QG, AEP)	3	Nitrates, Pesticides

Tableau 2: Qualité des masses d'eaux souterraines du bassin Loire-Bretagne (SDAGE Loire Bretagne 2022-2027).

II - 7. Occupation du sol

II - 7.1. Pédologie

Les sols caractéristiques de la plaine du Sud-Vendée sont des sols dits de « groies ». Ce sont des sols argilo calcaires caillouteux et superficiels, formés par altération et décarbonation des calcaires. Ils sont composés d'une couche labourée de seulement 15 à 20 cm d'épaisseur et la texture est argilo-limoneuse avec 25 à 40% d'argile (Irrinov Vendée Arvalis, 2006). Comme illustré sur la figure ci-dessous deux types de groies peuvent être différenciées en fonction du type de sous-sol calcaire et de son degré de fissuration. Les terres de groies superficielles se situent sur des calcaires très peu fissurés qui bloquent la progression des racines, la réserve utile totale développée dans ces sols varie entre 50 et 80 mm (Ibid). Les terres de groies moyennes ont des réserves utiles qui varient entre 80 et 120 mm, elles reposent sur des marnes ou des calcaires fissurés sur plus de 50 cm, qui sont bien colonisés par les racines, et dans lesquels on retrouve de la terre fine (Ibid).

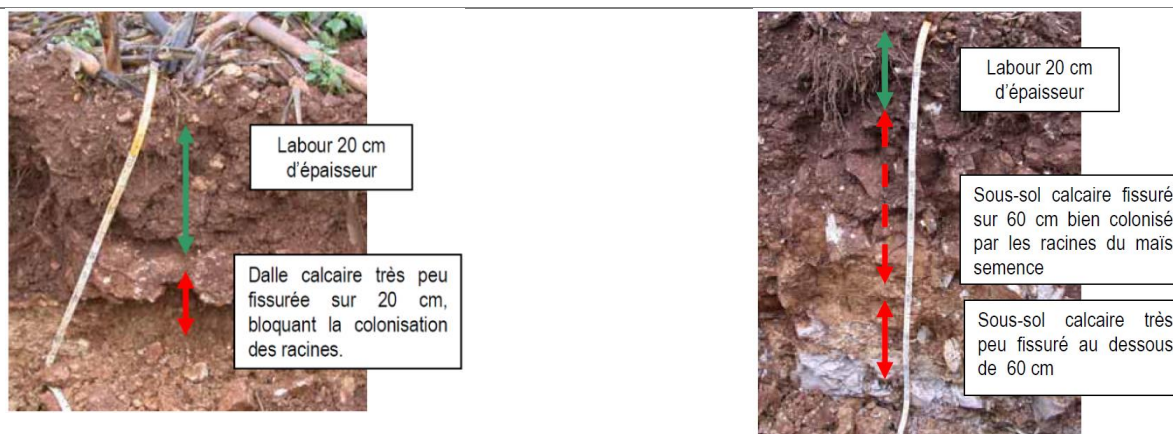


Figure 29 : Gauche : groie superficielle à Thiré (85). Droite : groie moyenne à Fontaines (85) (Source : Irrinov Vendée Arvalis, 2006. Figure reproduite avec l'autorisation d'Irrinov).

Sur le secteur des Autize, les argiles de décarbonations et les limons éoliens se sont maintenus principalement sur le haut de la plaine calcaire. Ainsi au nord et aux sommets des interfluves on retrouve des sols plus argileux et profonds, avec des groies moyennes voir profondes (20 à 40 cm) et dans les fonds de vallée, sur les calcaires plus marneux, des sols plus épais de colluvions et d'alluvions (Pichot, 2019). Au sud de la plaine, on retrouve des petites groies (10 à 20 cm) sur les calcaires karstiques mais aussi des sols limoneux plus profonds, jusqu'à un mètre.

II - 7.2. Agriculture

Comme nous pouvons le constater sur la carte ci-dessous, le secteur des Autizes est un territoire essentiellement agricole, avec quelque surface urbanisée, ainsi que plusieurs zones forestières situées principalement dans les fonds de vallées et la tête du bassin versant.

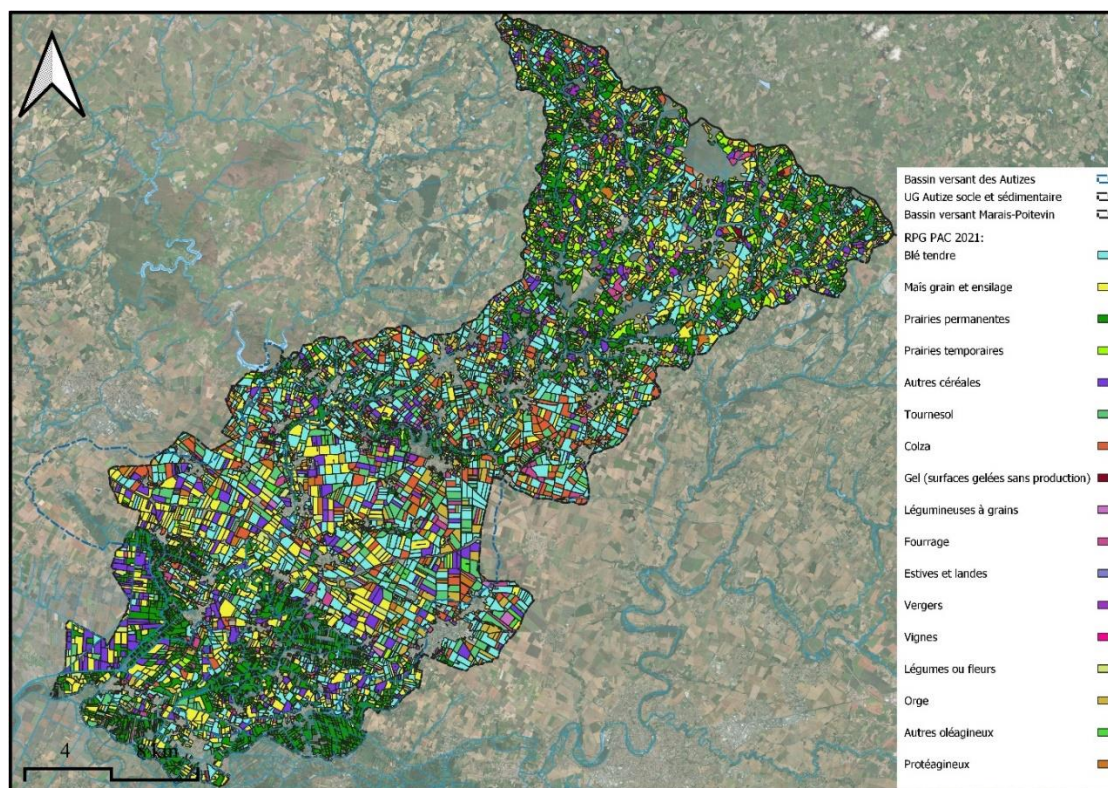


Figure 30: Répartition des assolements sur les unités de gestion du secteur des Autizes en 2021 (Données : RPG 2021).

Au niveau des assolements dominants nous pouvons distinguer globalement quatre zones. Sur le secteur amont, les assolements se partagent entre des prairies permanentes, temporaires ainsi que du maïs et du blé tendre. Ensuite, une zone intermédiaire, où l'on retrouve principalement des cultures de blé tendre et de colza ainsi que des prairies au niveau des fonds de vallées. Ensuite, le secteur de plaine avec une nette dominance des grandes cultures de céréales, blé tendre et maïs. Enfin, le secteur de marais, avec d'une part les Marais mouillés composé de prairies permanentes et de l'autre les Marais desséchés où se sont les cultures de céréales et de maïs qui prédominent.

Globalement, les rotations qui sont mis en place sur le secteur de plaine sont maïs/blé ou même maïs/maïs pour les parties irriguées et blé/colza/blé/tournesol sur petites groies pour les parties non-irriguées (Pichot, 2019).

II - 7.3. Irrigation

Avant le tournant du milieu des années 70, il existait une petite irrigation pour le tabac et le maraîchage, avec des prélèvements en rivière ou en puits. L'irrigation va permettre à la fois d'augmenter le rendement moyen et de limiter les variations interannuelles. En premier lieu l'irrigation s'est concentrée sur les petites groies car le différentiel de rendement y était plus important (Pichot, 2019).

C'est donc principalement sur la partie sud karstique du plateau que s'est développée préférentiellement l'irrigation, et notamment sur les secteurs les plus productifs de l'aquifère du Dogger où les forages ont pu être réalisés. Mais également en bordure de l'Autize et en bordure des Marais mouillés à de moindre profondeur. De plus, sur ces terres très séchantes, il y a moins de risques de battance.

La pratique de l'irrigation est favorisée également pour des exploitations bénéficiant de grande surface et de parcelles regroupées, car les réseaux de distributions sont plus faciles à mettre en place et à rentabiliser sur des larges surfaces que sur des parcelles morcelées (Pichot, 2019).

Ainsi les petites et moyennes exploitations qui ne cherchent pas à irriguer ou qui n'ont pas la ressource sur leur terre ou les moyens, vont petit à petit disparaître au fil des années 80. Les surfaces labourées augmentent et les prairies permanentes sont labourées, l'orientation se généralise vers la céréaliculture avec les premiers contrats semences qui se mettent en place pour les exploitations qui ont un accès à l'eau dans les années 80, notamment avec la CAVAC (Coopérative agricole Vendéenne Approvisionnement Céréales).

Les surfaces irriguées sur le secteur des Autizes sont passées de 451 ha. en 1979 à 1381 ha en 1988 et 2852 ha dans les années 2000 (Safege, 2004), elles ont augmentées d'un facteur 6 en 30 ans.

	Exploitations en ayant 2010	Exploitations en ayant 2020	Surfaces (ha) 2010	Surfaces (ha) 2020	Surface irriguée (ha) 2010	Surface irriguée (ha) 2020
Total SAU	253	218	23 674	23 698	4 203	4 699
Céréales	194	175	12 227	11 411	3 496	3 589
Oléagineux	135	133	2 996	3 186	150	146
Protéagineux et légumes secs pour leur graine	21	68	115	752	22	307
Légumes frais, plants de légumes, melons ou fraises	19	28	208	171	154	108
Fourrages annuels	78	71	1 368	1 439	298	397
Prairies	189	190	5 886	6 138	20	18
Vignes	12	11	142	238	22	79

Tableau 3: Evolution des assolements et surfaces irriguées sur le secteur de l'EPCI Vendée, Sèvre, Autize. (Données : Agreste – recensements agricoles 2010 et 2020)

Sur le tableau ci-dessus est représenté l'évolution des surfaces des différents assolements ainsi que la part de surface irriguée entre 2010 et 2020 sur le secteur de l'EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale) Vendée, Sèvre, Autize, qui correspond en très grande partie à l'unité de gestion Autize nappe (UG14). On remarque que les surfaces irriguées ont augmenté de l'ordre de 500 ha entre 2010 et 2020 et ce principalement pour des cultures de type protéagineux.

II - 8. Relation eaux souterraines et eaux de surfaces

II - 8.1. Situation générale

Naturellement, en l'absence de prélèvement, en période d'étiage les niveaux piézométriques des nappes en périphérie du Marais s'équilibrent avec les eaux du réseau superficiel et restent légèrement supérieurs ou égaux aux niveaux des eaux du marais. Au nord du Marais, depuis les années 1980, l'été, les nappes n'alimentent plus le Marais par les sources de débordements ni par le soutien au débit de base des cours d'eau. Lorsque les niveaux piézométriques descendent en dessous de la cote de l'eau dans les canaux, ce sont même les réseaux superficiels qui peuvent alimenter la nappe, avec une inversion des gradients hydrauliques et des flux. Au niveau des chroniques annuelles cela se traduit par un maintien puis un effondrement des niveaux piézométriques.

Au sud du Marais, le bri repose sur les couches du Jurassique supérieur qui n'est aquifère que dans une tranche altérée d'une trentaine de mètres, les relations entre le réseau superficiel et la nappe semblent être essentiellement indirectes, mais des surcreusements de canaux, le curage et la création de ports peuvent avoir créé des zones de contact localement (Groupe d'expert, 2007).

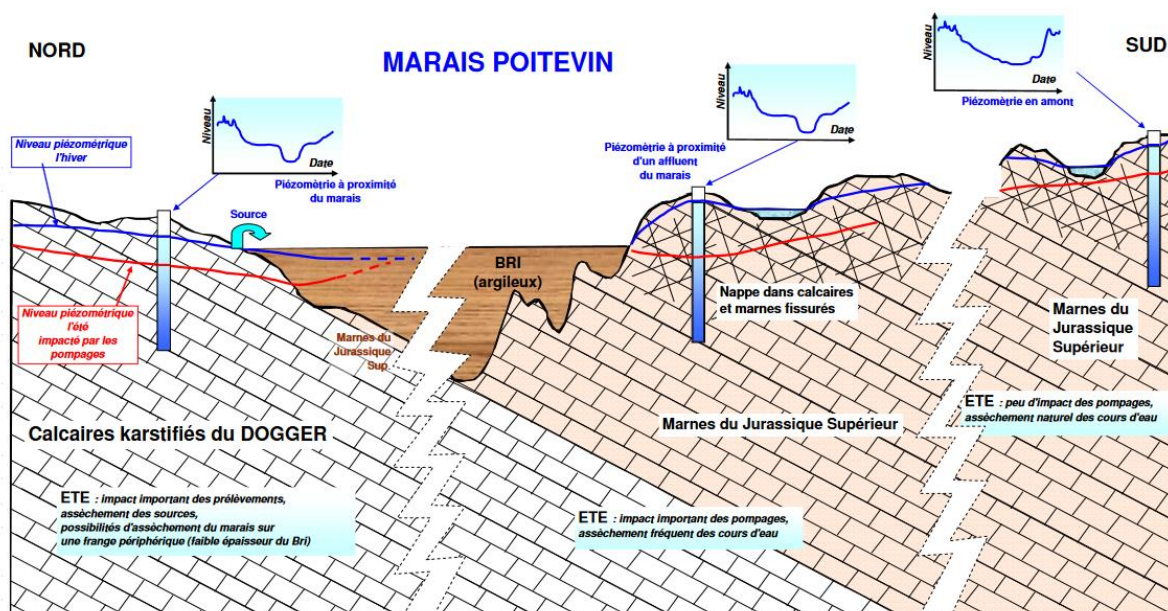


Figure 31: Équilibre entre nappes de bordure et Marais en été (Groupe d'expert, 2007).

II - 8.2. Contexte des Autizes

Dans son cours amont, l'Autize s'écoule directement sur le socle, dont la frange altérée n'apporte pas un soutien au débit de base conséquent. Ensuite, à l'entrée de la plaine calcaire, l'Autize s'écoule en partie sur le socle qui peut affleurer en fond de vallée, mais elle est en contact également avec le Lias (Infra-Toarcien). Au niveau de son cours moyen l'Autize méandré sur ses alluvions récentes et elle est en relation étroite avec la nappe du Dogger à partir de Xanton-Chassenon jusqu'à la Porte de l'Île à l'entrée du Marais avant sa séparation (Bresson, 1977). Sur ce secteur, à l'est comme à l'ouest sur l'ensemble de la plaine du Dogger s'étendent des vallées sèches avec un réseau hydrographique de surface particulièrement peu développé et des écoulements principalement souterrains qui viennent alimenter le Marais mouillé via un réseau de sources de bordures et de résurgences.

En période de hautes eaux l'Autize draine la nappe sur la totalité de son cours aval ainsi qu'entre St-Hilaire et Xanton-Chassenon en été (Domez et al., 2010). En période d'étiage, sur un secteur qui commence juste en amont de Nieul, c'est l'Autize qui va alimenter la nappe, jusqu'à disparaître complètement sous son lit, sans écoulement visible. Sur ce secteur l'Autize est en équilibre hydrodynamique avec la nappe du Dogger et peut constituer un apport majeur en période d'étiage particulièrement.

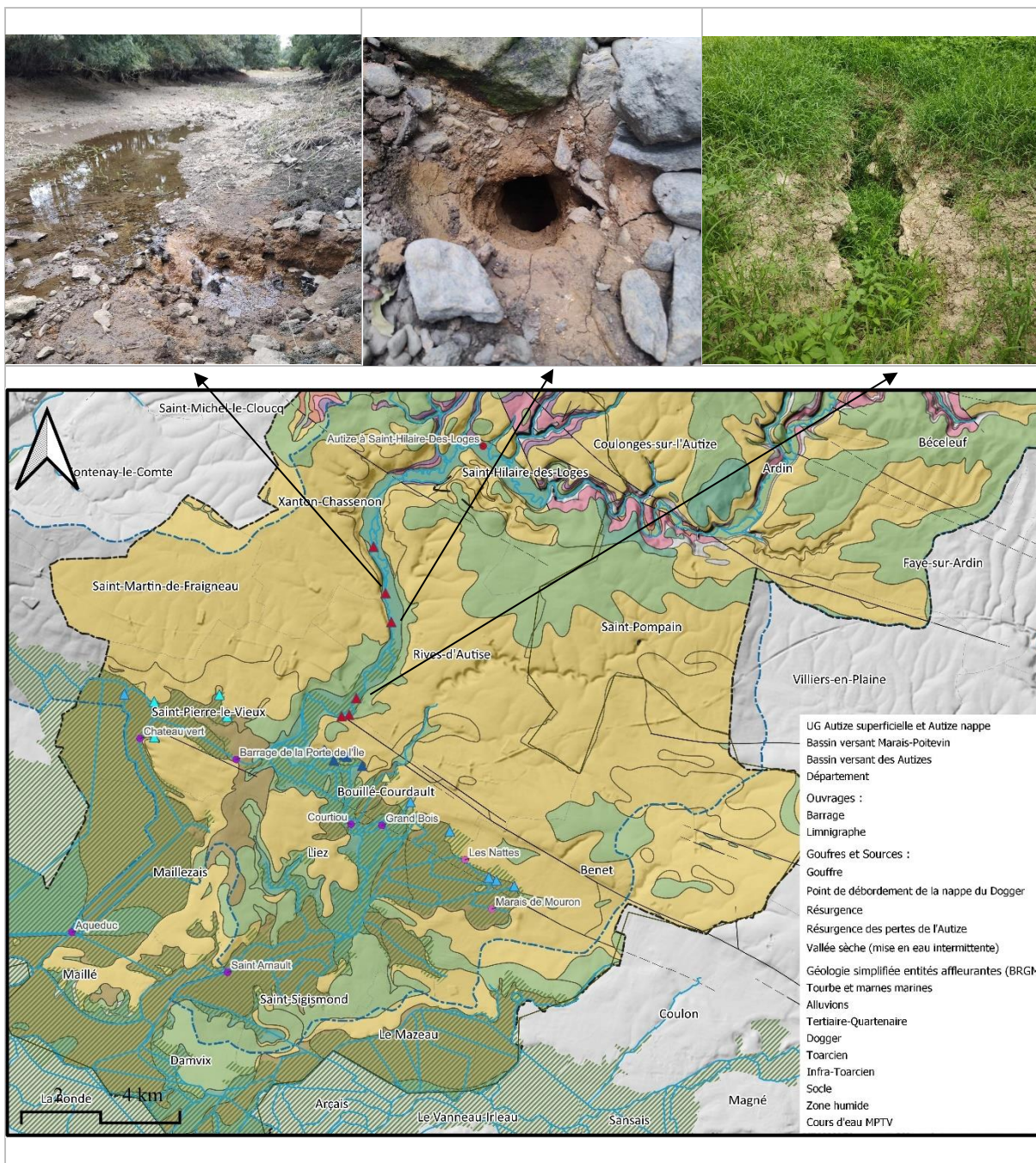


Figure 32: Gouffres, résurgences et sources de bordures du secteur des Autizes (Photos prises le 23/07/2023. Données : Réseau de surveillance des sources de bordure du MPTV, BRGM).

Sur la carte ci-dessus nous pouvons noter une série de gouffres avec pertes karstiques situés au sein du lit mineur de l'Autize, les premiers sont situés à quelques kilomètres en aval de St-Hilaire-des-Loges et l'on en retrouve jusqu'à la séparation de l'Autize, entre la Vieille Autize et le canal de la Jeune Autize au niveau du Marais¹⁰. On observe également une série de sources qui s'alignent relativement bien au niveau où le Dogger passe en dessous des formations du Jurassique supérieur, à proximité du Marais, en suivant une faille qui se démarque assez nettement à l'Est, en rive gauche.

Un canal parallèle au lit de la Vieille Autize vient capter les eaux de plusieurs résurgences du Dogger notamment vers Bouillé-Courdault. Dans le cours de la Jeune Autize canalisée, qui commence au

¹⁰ Dans son étude sur les nappes du Jurassiques du sud-Vendée, Bresson concluait d'ailleurs que tout projet de stockage d'eau sur la partie amont pour réguler les débits d'étiage de l'Autize, était voué à l'échec, au vu de ces pertes liées au toit de cet horizon aquifère particulièrement perméable (Bresson, 1977).

niveau de la Porte de l'Île à St-Pierre-le-Vieux pour se jeter dans la Sèvre-Niortaise à Maillé, tout un système d'écluses maintient un plan d'eau durant l'étiage. D'ailleurs, au niveau de la Porte de l'Île, des essais de baisse du niveau d'eau ont engendré une baisse des niveaux piézométriques au piézomètres d'Oulmes (Compère et Thion-Larminach, 2021).

Pellerin (2004), précise que ce sont les pertes situées en amont du village de Nieul dans le lit mineur de l'Autize qui alimentent les résurgences situées à proximité des biefs supérieurs de la Vielle Autize, qui se concentrent pour une partie au village de Bouillé mais se prolongent également sur les communes de Bouillé-Courdault, Benet et St-Sigismond. Les eaux de surface de l'Autize continuent majoritairement leur chemin pour aller alimenter les biefs de la Jeune Autize.

II - 8.2.1. Débit de base

Comme nous l'avons vu, les eaux souterraines de trois formations différentes contribuent au débit de base de l'Autize et viennent soutenir les débits d'étiages. Il est donc complexe de départager les volumes en jeu, et nous ne pouvons appliquer la loi de Maillet pour analyser les courbes de tarissements.

En situation influencée par les prélèvements, les résultats de sorties du modèle maillé du BRGM, traduisent un apport de l'Infra-Toarcien aux cours d'eau tout au long de l'année, entre 0.5 et 1 millions de m³/mois (Doez, 2010). Le Dogger apporte un important soutien aux débits de base du réseau hydrographique, particulièrement en période de recharge, (jusqu'à 2 M.m³/mois) et on observe également des apports assez minces des cours d'eau à la nappe à la fin de forte période d'étiage (Doez, 2010).

II - 8.3. Apports des nappes au Marais

II - 8.3.1. Inversion du sens d'écoulement

Il existe des particularités hydrographiques qui font que les effets des prélèvements estivaux sont particulièrement visibles sur le secteur des Autizes (Pellerin, 2004). Ainsi, au village d'Aziré un embarcadère est aménagé au niveau d'une source assez importante qui alimente le Marais. La source est isolée du réseau de canaux et de fossés du Marais par un batardeau qui rend particulièrement visible les différences de niveaux d'eaux de part et des flux inverses (du Marais vers la nappe) peuvent y être observés (Pellerin, 2004). L'Association de Défense de la Vielle Autize (ADVA) s'est d'ailleurs créée afin de mettre en évidence ce phénomène et militer pour sa résorption.

On retrouve une situation analogue sur la rive droite de l'Autize, où des sources se sont formées au niveau du contact entre les formations du Bathonien et le Marais, elles alimentent les biefs de la Jeune Autize et du Marais Mouillé de Doix/Fontaine. Lorsque les hauteurs piézométriques subissaient un rabattement trop important, le bief de la Jeune Autize situé le plus en aval a pu être alimenté à contre-courant directement par la Sèvre-Niortaise (Pellerin, 2004).

Ce phénomène a débuté à partir de 1981 pour se généraliser depuis 1989, ainsi les fuites vers la nappe à partir des canaux de bordure et des sources de débordement ont pu être important au point de mobiliser la Jeune Autize jusqu'à la Sèvre Niortaise (Groupe d'expert, 2007).

Selon une étude réalisée par l'Institution Interdépartementale du Bassin de la Sèvre Niortaise (IIBSN) en 2006, le phénomène de soutien de la nappe par le Marais qui a été mis en évidence sur le bassin de l'Autize se retrouve en divers endroits au nord du Marais poitevin comme pour certains biefs du bassin de la Vendée, et de manière beaucoup plus ponctuelle au sud du Marais, où les décrochages de la nappe entraînent uniquement un arrêt de l'alimentation du Marais (Groupe d'expert, 2007). Plusieurs études se sont attachées à caractériser ce phénomène.

Des travaux réalisés par CALLIGEE pour la CLE du Lay (rapport N06-85254-C, 2007), ont pu montrer le lien direct entre l'assèchement des marais de bordure et le rabattement de la nappe du Dogger, et préciser que ces assèchements étaient limités à la fois dans l'espace et dans le temps avant les prélèvements pour l'irrigation (Groupe d'expert, 2008).

Pellerin a réalisé entre juin et octobre 2002 une analyse des fluctuations réciproques entre la nappe du Dogger au piézomètre d'Aziré (Benet) et le niveau des fossés des nattes. La figure ci-dessous montre une corrélation assez nette entre la baisse des niveaux piézométriques et des niveaux dans le Marais. Les sens des écoulements ont également été relevés, ils mettent en évidence un inversion des flux du Marais vers la nappe, dès que le niveau passe en dessous du niveau des fossés, et particulièrement au-delà d'une différence de 20 à 30 cm (Groupe d'expert, 2007).

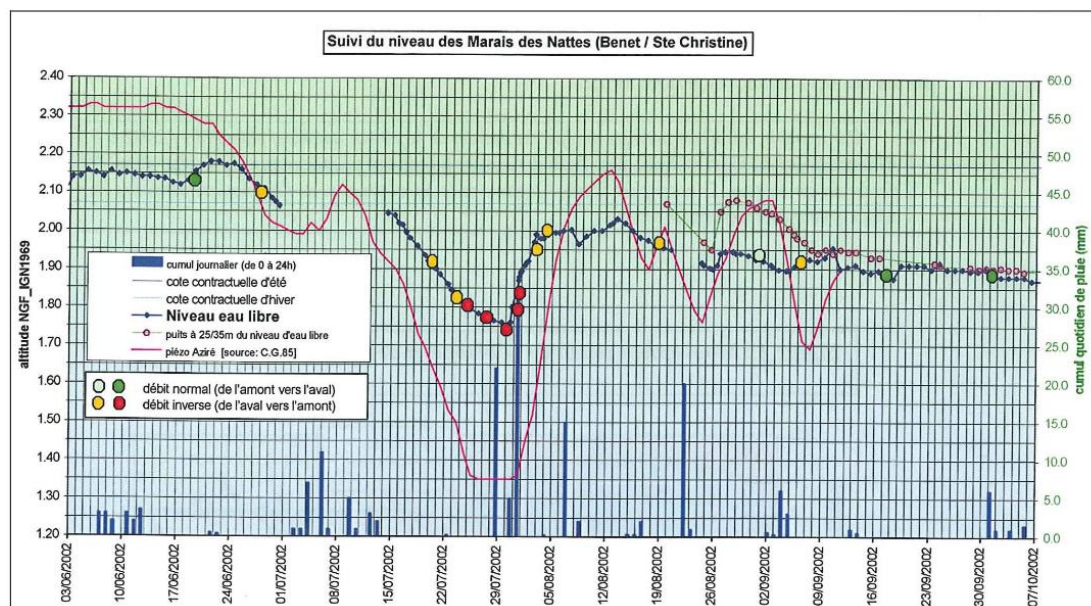


Figure 33: Fluctuations réciproques des niveaux d'eau dans le marais des Nattes (Bief de Saint-Arnault) et de la piézométrie à Aziré durant l'été 2002 avec indication du sens du flux d'eau (d'après F.M. Pellerin) (Groupe d'expert, 2007) Concernant les débits, les couleurs vont du bleu au vert et du jaune au rouge en fonction de l'intensité.

Comme nous l'avons vu plus haut, naturellement et en période de hautes eaux particulièrement, il existe des échanges par drainance verticale à travers le bri, entre les réseaux superficiels et les calcaires du Dogger qui sont captifs sous le bri flamand. C'est un phénomène qui se retrouve en particulier au niveau des Marais mouillés périphériques du Nord, où le poids du bri, mais aussi son épaisseur et sa teneur en argile n'est pas suffisant pour assurer une imperméabilité (Groupe d'expert, 2008).

Ainsi, les pompes entraînent des rabattements de nappes qui peuvent provoquer un assèchement des marais de bordures qui ne se résume pas uniquement à l'arrêt du soutien via les sources de débordements et le soutien d'étiage aux cours d'eau mais aussi par l'arrêt de la drainance verticale à travers le bri.

Le travail de modélisation des nappes du Sud-Vendée de Calligée et HydroExpert (1995), a pu préciser que ce phénomène apparaîtrait uniquement à partir de septembre et octobre en conditions naturelles, et il a permis d'avancer plusieurs fourchettes de valeurs afin de quantifier ces phénomènes (Groupe d'expert, 2007).

La somme des apports par les sources de débordements et par drainance verticale au nord du Marais était estimée à 2,3 m³/s en période estivale en situation non influencée (CACG, 2002). Le déficit d'apport en eau au Marais dû aux pompes dans les nappes entre le 1^{er} mai et le 30 septembre était de 0,9, 4,9, et 4,1 M.m³ pour les zones ouest, centre et est, et la perte de débit drainé à 1m³/s en moyenne entre juillet et septembre (Groupe d'expert, 2007). Au niveau des apports par drainance verticale spécifiquement, les déficits étaient évalués par le modèle à 96 % pour la zone est et ouest, et à 91 % pour la zone centre (Ibid).

II - 8.3.2. Marais mouillé de la Vielle Autize

Avec les données disponibles dans le secteur de Bouillé-Courdault, nous pouvons observer les relations entre la nappe de bordure et les hauteurs d'eaux d'un des biefs du réseau tertiaire du Marais mouillé de la Vielle Autize, le Marais des Nattes, depuis 2010.

On observe sur la figure ci-dessous (à droite), que la relation entre les hauteurs piézométriques du puits de l'Aubier et du piézomètre de Benet (Aziré) est linéaire, les deux varient de manière nettement corrélée, avec des niveaux légèrement plus haut au piézomètre de Benet (Aziré). A gauche on peut remarquer que le niveau du Marais des Nattes est maintenu entre 2 et 2.25 m. NGF tout au long de l'année, cependant lorsque les niveaux piézométriques de la nappe enregistrés au puits de l'Aubier descendent en dessous de 2m. NGF les niveaux enregistrés dans le fossé au Nattes peuvent s'abaisser fortement et descendre en dessous du niveau de la nappe, durant les mois de juillet à novembre. Inversement, au-dessus de 3m. NGF au puits de l'Aubier les niveaux dans le Marais des Nattes peuvent augmenter, en général durant les mois de janvier à mars.

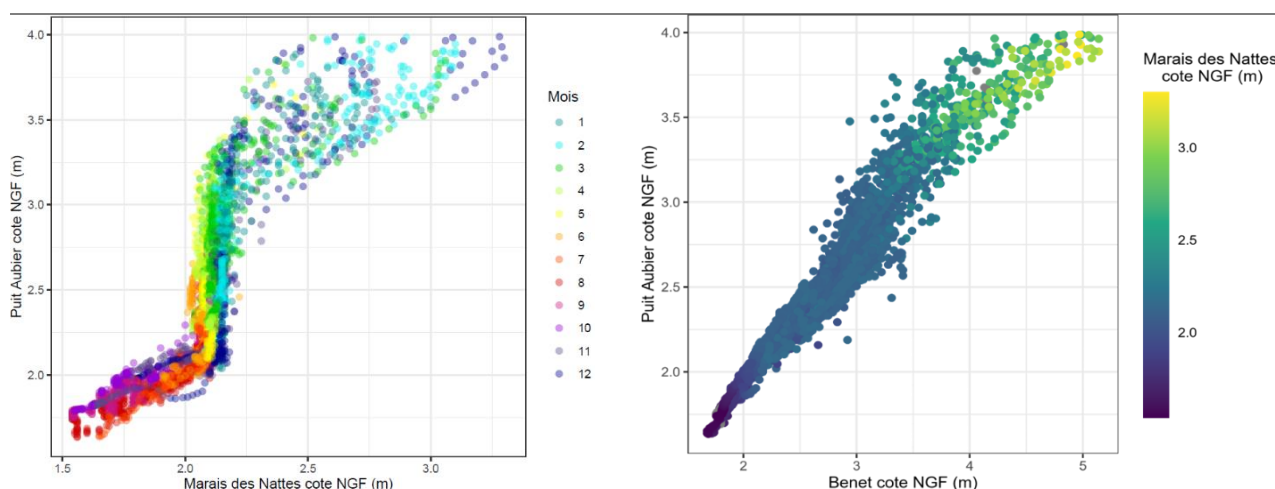


Figure 34: Gauche : Hauteur d'eau du puit de l'Aubier et du Marais des Nattes. Droite : Hauteur d'eau du puit de l'Aubier et du piézomètre de Benet (Aziré) en fonction de la hauteur d'eau du Marais des Nattes (Source : EPMP et ADES).

Les phénomènes d'inversions de hauteur d'eau entre les biefs des Marais mouillés et la nappe de bordure semblent s'être fortement résorbés depuis 2010. Ainsi, si les niveaux ont tendance à se rapprocher jusqu'à s'égaliser à la fin de l'été, il n'y a plus d'inversion de hauteur d'eau enregistrée entre le piézomètre d'Aziré et les canaux de bordures.

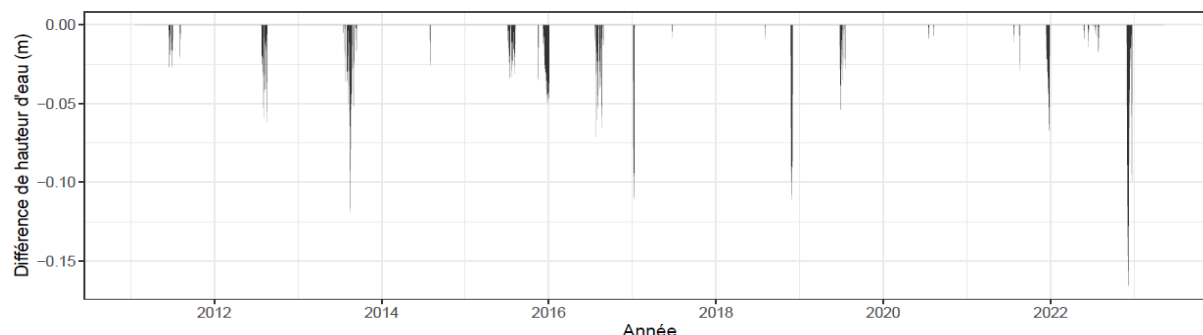


Figure 35: Différence de hauteur d'eau entre le puits de l'Aubier-Gaillot et le Marais des Nattes (Source : EPMP).

On peut néanmoins observer de légères inversions ponctuelles et relativement peu étendues dans le temps. Sur la figure ci-dessus, la différence de hauteur d'eau entre le puits de l'Aubier Gaillot et le Marais des Nattes est représentée lorsque la valeur est négative, entre 2011 et 2023. On observe

généralement une fois dans l'année de légères inversions en période estivale qui ne dépasse rarement 5 ou 10 cm, mais également plusieurs fois en période hivernale à partir de l'hiver 2015-2016, la plus haute cote ayant été atteinte durant l'hiver 2022-2023.

II - 8.3.3. Fuseau de gestion du Marais mouillé de la vielle Autize

Le dernier protocole de gestion des cotes des barrages du Marais mouillé de la vielle Autize, vise notamment à prévenir des phénomènes d'inversion du gradient, en veillant à ce que les niveaux de la surface piézométrique des nappes dans les secteurs de contact avec la zone humide soient toujours supérieurs aux niveaux des fossés de bordure et des cours d'eaux. Ainsi, les ouvrages hydrauliques qui déterminent les hauteurs d'eau dans les réseaux de biefs du Marais mouillé à proximité d'Aziré, comme le bief de Saint Arnault, sont gérés différemment selon que le niveau piézométrique d'Aziré est situé au-dessus ou en-dessous de la cote de 2.3 m. NGF. En dessous de cette cote il est estimé que les apports des nappes au marais sont insuffisants pour garantir les besoins de la végétation des Marais mouillés de ce secteur (EPMP, 2022).

II - 8.4. Eaux de surfaces et piézométrie

Sur la figure ci-dessous, on peut observer les niveaux piézométriques de Benet (Aziré) en fonction de ceux du Grand Nati (Oulmes), selon les mois de l'année et leur évolution au cours des trois dernières décennies. Les niveaux les plus bas ont été atteints avant les années 2000, et toujours lors des mois d'août et septembre.

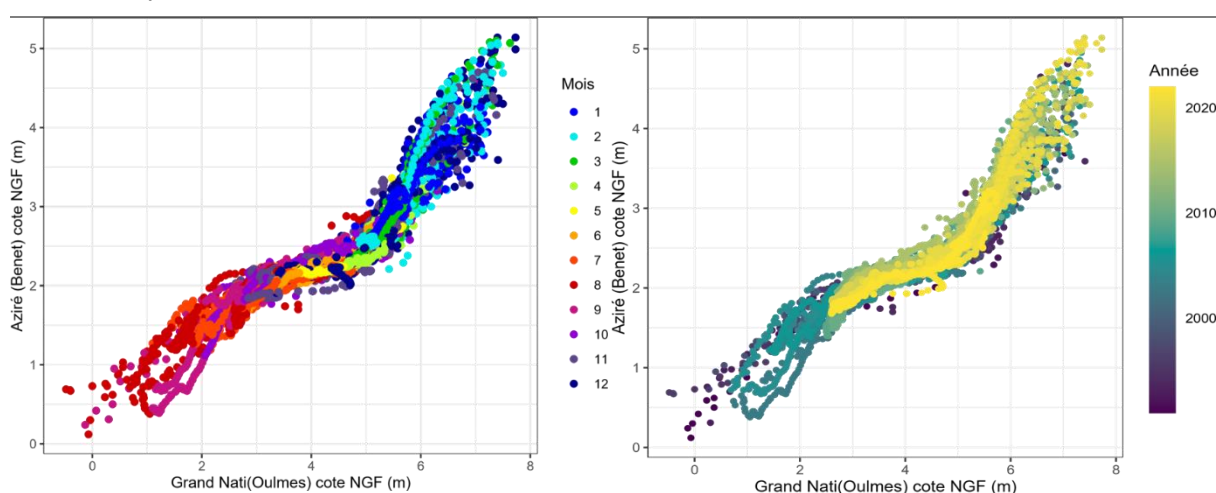


Figure 36: Lien entre les niveaux piézométriques à Oulmes et à Aziré selon les années et les mois (Données : ADES).

En dehors d'un palier qui se situe entre les côtes 2 et 3 m. NGF à Aziré et 3 à 5 m. NGF à Grand Nati, on observe une relation relativement linéaire entre les deux piézomètres. Entre 2m NGF jusque 5m NGF les variations des niveaux au Grand-Nati ne s'accompagnent pas de variations à Aziré, ce qui semble indiquer un soutien par les eaux superficielles du niveau piézométrique d'Aziré, on peut penser à des apports des biefs du réseau tertiaire du Marais mouillé. Ainsi, lorsque le niveau piézométrique baisse au Grand Nati à partir de 5 m. NGF le niveau à d'Aziré se maintient, et c'est seulement en dessous d'une cote située entre 2 et 3 m. NGF au Grand-Nati que le niveau s'effondre pour les deux, durant les mois d'août, septembre et octobre.

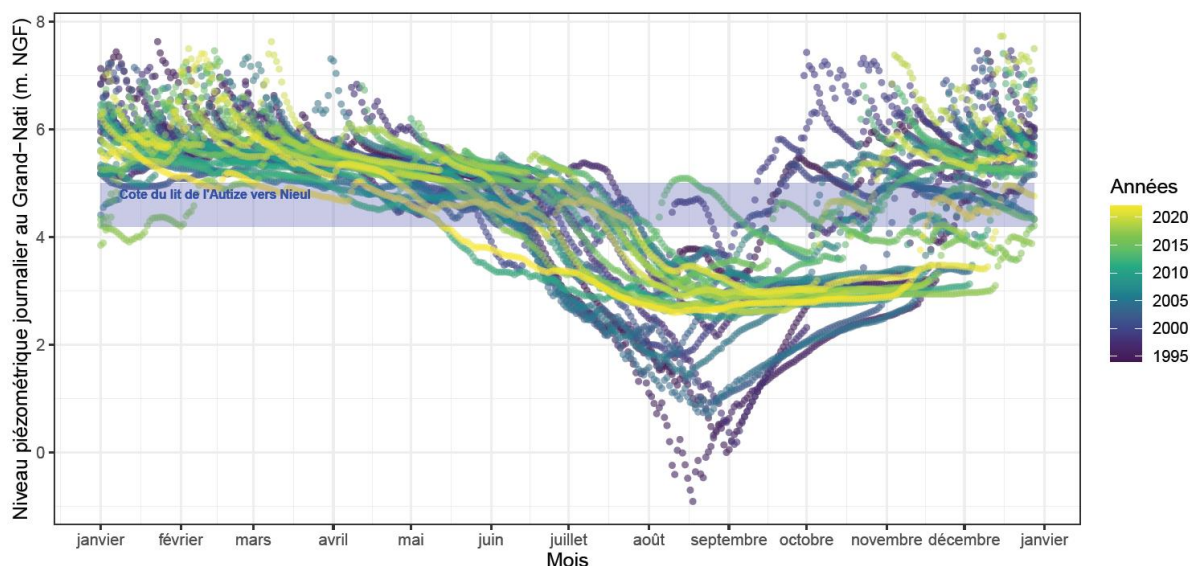


Figure 37: Niveau piézométrique journalier au Grand-Nati (Données : ADES).

Le niveau du piézomètre du Grand-Nati (Oulmes) oscille entre 5 et 7 m. NGF en dehors des périodes de prélèvements estivaux, avec un palier assez net à 5 m. NGF entre avril et juin, que l'on peut distinguer nettement sur la figure ci-dessus. Selon plusieurs auteurs, le palier à 5 m. NGF qui précède une diminution rapide des niveaux liée aux pompages est la marque du soutien de la nappe par l'Autize, dans des secteurs où la nappe devient captive sous le Callovien et le Bri du marais (Compère et al., 2020 ; Rouxel et al., 2007).

Le lit de l'Autize dans ce secteur, est situé autour d'un niveau altimétrique entre 4,2 et 5 m. NGF. Un essai de baisse rapide du niveau d'eau au barrage de la Porte de l'Ile a d'ailleurs entraîné une baisse du niveau piézométrique au Grand-Nati (CACG, Aquascop, Calligée, 2021).

Si l'occurrence d'assecs sur ces tronçons en aval de Nieul, est en partie naturel, leur étendue dans le temps et leur sévérité l'est sans doute moins, avec une amplitude de battement non influencé qui ne semble pas descendre naturellement sous le palier de 4.2 m. NGF (Compère et al., 2020).

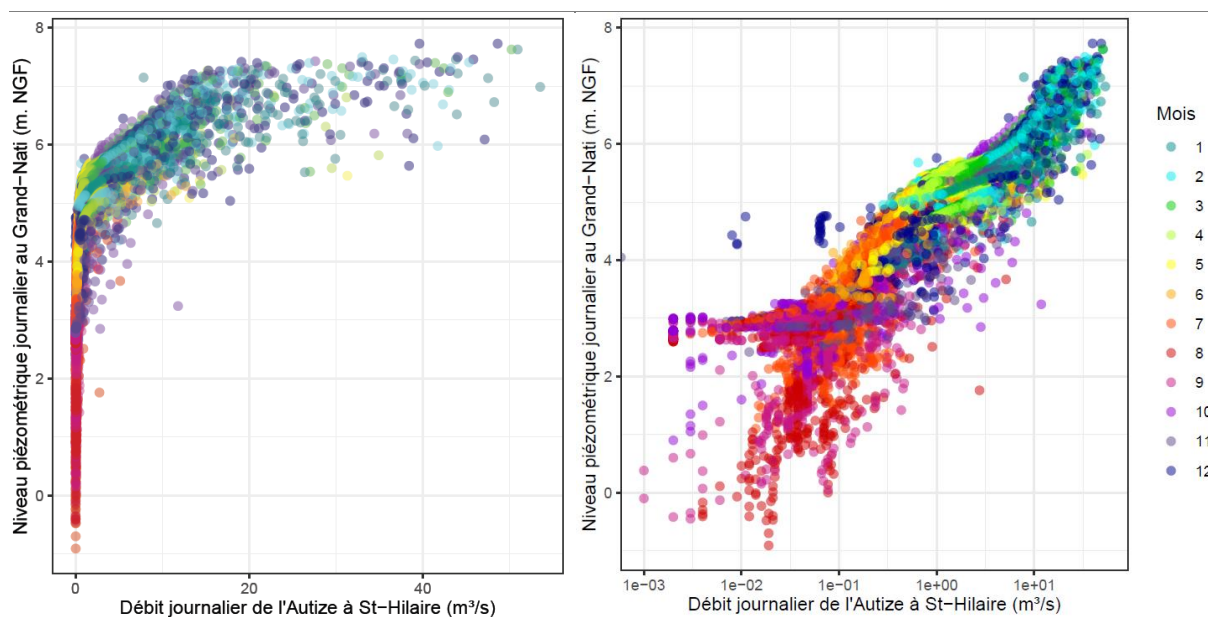


Figure 38: Relation entre le niveau piézométrique au piézomètre d'Oulmes et le débit à la station St-Hilaire en valeur moyenne journalière (Données : ADES et HydroPortail).

Le Grand-Nati est le piézomètre situé le plus proche de l'Autize (500 m). On observe un palier, proche de 5,25m NGF, au-dessus duquel il semble se démarquer une relation plutôt linéaire entre le niveau piézométrique au Grand-Nati et le débit de l'Autize à St-Hilaire. Ainsi, il faut atteindre des niveaux piézométriques de 4.5 à 5.5m NGF pour que les débits puissent atteindre des valeurs supérieures 1,5 m³/s. On observe sur la figure ci-dessus à droite, où les débits sont représentés de manière logarithmique (log10), que pratiquement aucun débit supérieur au m³/s n'est mesuré lorsque le niveau piézométrique est inférieur à 4m NGF.

II - 8.5. Réseau ONDE

Dans le cadre du réseau ONDE (Observatoire National des Etiages) coordonné par l'OFB (Office Français pour la Biodiversité) un état de l'écoulement des cours d'eaux de France est relevé une à plusieurs fois par mois de juin à septembre et parfois également sur des périodes plus longues selon l'ampleur des étiages. Notons que cela ne permet pas de connaître précisément le linéaire d'assec. En 2022 l'étiage sur l'Autize s'est prolongé jusqu'en novembre (avec moins de 10 l/s mesurés à St-Hilaire-des-Loges entre le 21/07 et le 20/10).

Il existe 6 points de surveillance du réseau ONDE sur les Autizes. Sur la partie « sédimentaire » il existe le point « l'Autize à Saint-Pierre-le-Vieux » suivi depuis 2011, et sur la partie « Socle » 5 stations sont suivies depuis 2012, sur l'Autize et ses principaux affluents (cf. carte Figure 20).

Point d'observation	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Fréquence
Autize à St Pierre-le-Vieux	4/11	11/11	11/11	11/11	5/11	4/11	46/66 = 70%
Autize à Cours	/	1/10	0	1/10	/	/	2/30 = 6 %
Autize à Pamplie	/	5/10	2/10	3/10	/	/	10/30 = 33%
La Miochette à Pamplie	/	4/10	2/10	4/10	/	/	10/30 = 33%
Le Fenioux à Fenioux	/	5/10	2/10	2/10	/	/	9/30 = 30%
Le Saumort à Fenioux	/	2/10	0	3/10	/	/	5/30 = 16%

Tableau 4: Occurrence d'assec ou d'absence d'écoulement visible observé à minima une fois par mois aux points d'observations du réseau Ondes sur les Autizes : nombre d'assec/nombre d'observation. Les points d'observation sont ordonnés de l'aval à l'amont. (Données : ONDE).

L'occurrence d'assec pour les mois où les observations sont effectuées est représentée sur le tableau ci-dessus. On remarque que les assecs sont particulièrement fréquents pour le point d'observation situé à St-Pierre-le-Vieux sur la partie sédimentaire en aval de la station de débit de St-Hilaire-des-Loges. Sur ce point des assecs ont notamment été observés de juillet 2016 jusqu'au 13 janvier 2017, et du 25 mai au 24 novembre en 2022.

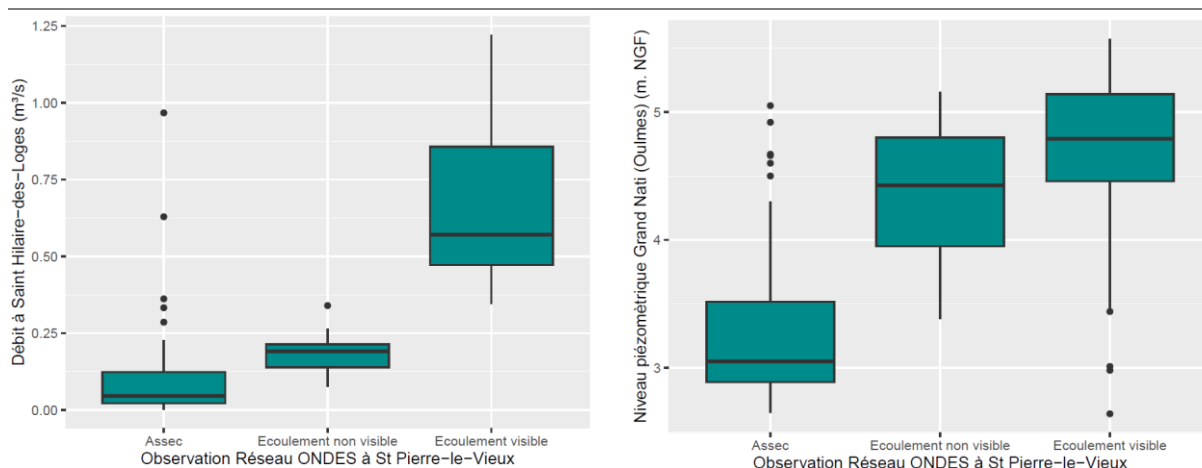


Figure 39: Gauche : Relation entre l'écoulement de l'Autize observé à la station de St Pierre-le-Vieux et son débit moyen journalier mesuré le même jour à Saint Hilaire-des-Loges. Droite : Relation entre l'écoulement observé et le niveau piézométrique moyen journalier enregistré le même jour au piézomètre du Grand-Nati (Données : Réseau ONDE, HydroPortail, ADES).

A partir de la figure ci-dessus nous pouvons déduire qu'il est nécessaire d'avoir un débit supérieur à 0.5 m³/s à la station de St Hilaire-des-Loges pour observer un écoulement visible en aval à St Pierre-le-Vieux. On peut estimer que c'est également un ordre de grandeur, du moins en période d'étiage, pour appréhender la part du débit qui est intercepté par les gouffres présents dans le lit de l'Autize entre St-Hilaire et St-Pierre, dans la mesure où la majeure partie des gouffres qui affectent le lit de l'Autize sont situés en amont (cf. Figure 32).

Malgré une certaine variabilité on observe également que 75 % des écoulements visibles à St Pierre-le-Vieux arrivent lorsque le niveau piézométrique enregistré au Grand-Nati est supérieur à 4.5 m NGF (la médiane est située à 4.75 m NGF). Cela semble en adéquation avec la cote du lit de l'Autize qui est située entre 4.2 et 5 m NGF dans ce secteur (cf. Figure 37) et cohérent dans la mesure où le point d'observation de St Pierre est localisé seulement 1 km en aval du piézomètre de Grand-Nati, à proximité du Marais mouillé (cf. Figure 20).

II - 8.6. Synthèse des éléments clés

Dans ce chapitre, nous avons pu apprécier l'hétérogénéité qui caractérise l'hydrogéologie du secteur Est de la plaine du Sud-Vendée. Nous avons pris connaissance du caractère naturellement intermittent du cours aval de l'Autize, mais également du rôle des prélèvements agricoles concernant l'étendue et la sévérité des étiages. Nous avons montré que si le phénomène d'inversion des hauteurs d'eau entre la nappe de bordure et le réseau de canaux du Marais mouillé s'est fortement résorbé il subsiste néanmoins périodiquement de légères inversions du gradient hydraulique.

Les cartes piézométriques dressées par Bresson en 1976 nous ont permis d'estimer les niveaux piézométriques relativement proche d'un état de référence pour les secteurs d'intérêt. En juillet 1975 les cotes étaient proches de 4,5 m NGF autour du piézomètre du Grand-Nati et d'environ 3,5 m NGF dans la zone de Bouillé-Courdault.

Enfin, nous avons étudié les relations entre les niveaux des piézomètres de références ainsi que les relations entre les eaux de surfaces et la piézométrie. On a remarqué que les piézomètres du secteur des Autizes sont tous situés en bordure du Marais et influencés par les eaux de surfaces. On a également observé que les débits de l'Autize enregistrés à St-Hilaire ne dépassent pas 1,5 m³/s lorsque que les niveaux piézométriques enregistrés au Grand-Nati sont inférieurs à 5,5 voire 4,5 m NGF. A ce propos, nous avons pu noter que les écoulements de l'Autize ne sont globalement visibles à l'entrée du Marais mouillé (75% des observations) que lorsque la cote au Grand-Nati dépasse 4.5 m NGF et/ou que des débits de plus de 0.5 m³/s sont enregistrés à St-Hilaire.

III - Gestion et substitution des prélèvements agricoles

III - 1. Historique

III - 1.1. Gestion des prélèvements

Dès 1992 il existait une forme de gestion de la ressource en eau souterraine dans le Sud-Vendée, qui reposait entre autres sur une concertation entre les organisations agricoles, les services de l'état et les associations de protection de l'environnement avant chaque saison d'irrigation (Mondain, 2008). Selon Lepercq et Laloux, à partir de 1995 des interdictions horaires de prélèvements le week-end se sont mises en place et ont pu conduire à limiter la baisse de la nappe mais cela a également poussé les irrigants à s'équiper de manière à compenser les réductions horaires (CACG, 2018).

Il existait deux types de gestion qui ont pu se superposer. Une gestion par niveaux de restriction, qui se faisait en fonction des dépassements observés sur des seuils de niveau piézométrique ou de débit sur des stations de références. Mais sur certain secteur il existait également déjà une forme de gestion volumétrique des prélèvements qui s'articulait autour de cotes piézométriques. A chaque irrigant était attribué un volume en fonction de sa consommation effective des années précédentes, qui était ventilé par quinzaine sur l'ensemble de la saison d'irrigation en fonction de l'assolement. Les deux premières cotes sont variables au cours de la saison estivale, visaient à ne pas atteindre une cote de crise fixe au-delà de laquelle tous les prélèvements étaient interdit. Il y avait d'abords la Piézométrie Seuil d'Alerte (PSA), qui une fois dépassée implique une réduction de 20% pour la quinzaine, et la Cote d'Alerte, une réduction de 35%. Ainsi, pour chaque secteur il existait des piézomètres de référence sur lesquels était apprécié les cotes de gestion (Mondain, 2008). La gestion volumétrique des prélèvements, avec des volumes attribués, n'a cependant été mise en place qu'à partir de 2001 sur les unités de gestion de l'Autize et de la Vendée (CACG, 2002).

III - 1.2. Volume prélevable et niveaux piézométriques objectifs

La notion de volume prélevable est définie dans la circulaire du 3 août 2010 relative à la résorption des déséquilibres quantitatifs en matière de prélèvements d'eau : « Le volume prélevable (pour l'irrigation) est celui devant permettre de satisfaire l'ensemble des usages, en priorité l'eau potable, en respectant les objectifs de la directive-cadre sur l'eau, en moyenne quatre années sur cinq ou huit années sur dix sans avoir à recourir aux arrêtés préfectoraux de restriction des prélèvements. Ce qui revient en d'autres termes à assurer le respect du débit objectif d'étiage quatre années sur cinq ou huit années sur dix. ».

Nous pouvons préciser ici, que le « volume prélevable » concerne uniquement la période de « basses eaux », il est défini pour une portion spécifique de territoire, les UGVP « unités de gestion de volumes prélevables ». Ce volume prélevable est dépendant d'un débit objectif d'étiage qui est un choix politique, basé sur des éléments techniques, révisable, tranché par la CLE et validé par le préfet. La CLE est responsable de la répartition de ce volume parmi les différents usages et usagers (CLE SNMP, octobre 2022).

Différentes études, développant diverses approches et méthodologies, ont été réalisées pour estimer les volumes prélevables et des indicateurs de gestions pertinents sur les différents bassins d'alimentation du Marais Poitevin. Une brève synthèse de ces études, de leurs méthodes et de leurs résultats pour le secteur des Autizes est présenté en annexe (au point 3).

Un groupe d'expert a été mandaté en 2007 par le gouvernement pour fixer les différents seuils objectifs d'étiage qui permettent d'assurer un équilibre hydrodynamique entre les nappes du sud Vendée et les niveaux maintenu dans le marais SAGEs.

Les niveaux objectifs d'étiages se déclinent en trois : un niveau piézométrique objectif de début d'étiage (POEd), pour limiter la période d'assec des cours d'eau, un niveau objectif de fin d'étiage (POEf), pour

garantir la reconstitution de la nappe et un niveau de crise (PCR) qui garantisse le maintien des écosystèmes associés et la pérennité de la nappe.

Les POEd et POEf ont été fixés à 4.6 et 3 m NGF au piézomètre du Grand-Nati et à 2.6 et 1.9 au piézomètre d'Aziré par le Groupe d'expert. Ce sont ces valeurs qui ont été reprises ensuite dans le SDAGE 2010-2015, avec une réhausse du POEf au Grand-Nati à 3.2 m NGF dans le SDAGE 2016-2021.

Les résultats pour le secteur des Autizes des différentes estimations de volumes prélevables en fonction de niveaux objectifs sont présentés de manière synthétique sur le tableau ci-dessous.

Volume	CACG 2002	BRGM 2007 (Rouxel et al.)	Groupe d'expert 2007	Calligée 2008		BRGM 2010 (Duez et al.)	BRGM 2020 (Compère et al.)
Objectif (respect 4 années sur 5)	DOE Autize = 0.15 m³/s	DOE Autize = 0.25 m³/s	POEd = 4.6 POEf = 3.00	PCR Grand Nati = 2.5	PCR Aziré = 1.6	POEd = 4.60 POEf = 3.00	POEd = 4.60 POEf = 3.20
Volume printemps/été M.m³	0.6	2	1.76	3.4	2.25	2.3	2.1 à 2.62

Tableau 5: Estimations des volumes prélevables sur le secteur des Autizes selon les niveaux objectifs de gestion.

III - 1.3. Seuil de gestions

Parallèlement aux niveaux objectifs de piézométries d'étiages, il existe aussi des seuils de gestions des prélèvements, comme la cote d'alerte, d'alerte renforcée et d'arrêt, qui ont également évolués. La cote d'arrêt total des prélèvements qui a prévalu jusqu'en 2006 était fixée à 0m NGF sur le piézomètre du Grand-Nati (elle a ensuite été fixée à 1.73 m NGF par le protocole de gestion en 2007 et enfin à 2.5 m NGF dans le SAGE SNMP 2008 (Lepercq et Laloux, 2018 ; Mondain, 2008).

Grand Nati (Oulmes)	Avant 2007	Protocole 2007	SAGE SNMP 2008	SDAGE 2010-2015	SDAGE 2016-2021
POEd	3.8 (01/06) -> 2.5 (19/08)		4.6	4.6	4.6
POEf	2.8 (.1/06) -> 1.5 (19/08)		3	3	3.2
PCR (crise/arrêt prélèvement)	0	1.7	2.5	2.5	2.5

Tableau 6 : Evolution des niveaux piézométriques objectifs et piézométrie de crise pour le piézomètre du Grand-Nati (Oulmes)

La cote de 2,5 m. NGF a été retenue comme PCR. A ce sujet, selon Pellerin (2004), la valeur de 2,5 m. NGF, a été reprise à partir des observations et des données qui ont été produites par l'Association de Défense de la Vieille Autize. Les observations de l'association montrent qu'en dessous de cette côte au piézomètre du Grand-Nati, on retrouve des assecs particulièrement sévères dans les deux biefs supérieurs de la Vieille Autize au niveau de Bouillé-Courdault, et le début des assecs du réseau tertiaire du bief le plus vaste de la Vieille Autize, situé beaucoup plus en aval (Pellerin, 2004).

Ainsi, cette cote de 2,5 m. NGF n'assurerait pas nécessairement l'absence de flux inverse, et si les cotes contractuelles des niveaux d'eau des biefs du marais sont maintenues, seul un seuil fixé à 4m. NGF garantirait l'absence de flux selon Pellerin (2004). La logique explicitée par le groupe d'expert qui a prévalu pour la fixation des seuils de gestion, n'était pas de fixer des niveaux objectifs qui permettent d'éviter totalement toute apparition de flux inverses, mais bien de limiter le phénomène (Groupe d'expert, 2007).

Dans le cadre du programme des Autizes (substitutions et gestion collective), un protocole de gestion a été établi en 2016, qui reprend toutes les modalités de la gestion collective et précise les différentes limitations des prélèvements selon les différents seuils (le protocole est détaillé en annexe au point 4).

Selon le protocole, le pilotage des prélèvements doit se faire de manière à privilégier les ressources les plus abondantes afin d'éviter les restrictions. De plus, en cas de restrictions sur les prélèvements, celles-ci s'appliquent à l'ensemble des prélèvements, en eau superficielles, en nappe ou en réserve. Il s'agit d'anticiper le plus possible la gestion de crise et d'engager chaque irrigant dans une responsabilité collective afin d'éviter que des arrêtés préfectoraux de restrictions des prélèvements soient pris durant la saison d'irrigation.

III - 2. Volume autorisé

Les volumes autorisés selon l'Autorisation Unique de Prélèvement (AUP) de l'arrêté inter-préfectoral 2021 pour les deux unités de gestion des Autize sont représentés dans le tableau ci-dessous. On remarque un volume printemps/été proche mais supérieur au dernier volume prélevable estimé par modélisation par le BRGM de 2.1 à 2.62 Mm³ (Compère et al., 2020).

Plan de répartition interdépartemental (2021)	Autize Nappe (MP14)		Autize Superficiel (MP8)		TOTAL	
Volume annuel (m3)	5.430.512	89,5%	635.601	10,5%	6.066.113	100%
Printemps/été (m3)	2.651.152	48,8%	252.601	39,7%	2.903.753	47,9%
Automne/Hiver (m3)	2.779.360	51,2%	383.000	60,3%	3.162.360	52,1%
Réserves (m3)	2.779.360	51,2%	174.000	27,4%	2.953.360	48,7%

Tableau 7 : Volume autorisé pour les unités de gestion des Autizes par l'Autorisation Unique de Prélèvement (Données : Arrêté inter-préfectoral AUP 2021).

III - 3. Volume prélevé sur les Autizes

III - 3.1. Evolution des volumes prélevés

La BNPE dispose des volumes annuels des prélèvements déclarés entre 2008 et 2021 à la fois pour les usages agricoles, industriels, et d'eau potable, les données sont basées sur les redevances des agences de l'eau. Pour le secteur des Autizes, l'essentiel des prélèvements se situent en Vendée, ils concernent principalement les eaux souterraines et sont majoritairement destinés à l'irrigation, à l'exception de trois ouvrages. Deux forages fournissent de l'eau potable, celui de la Marbière en Deux-Sèvres, captant en moyenne 80 000 m³ chaque année, et le forage de Lesson dans la commune de Benet en Vendée, captant autour de 50 000 m³ annuellement. Enfin, il existe un seul ouvrage industriel, qui fournit l'Usine de l'Union Laitière Venise Verte, avec autour de 25 000 m³ chaque année.

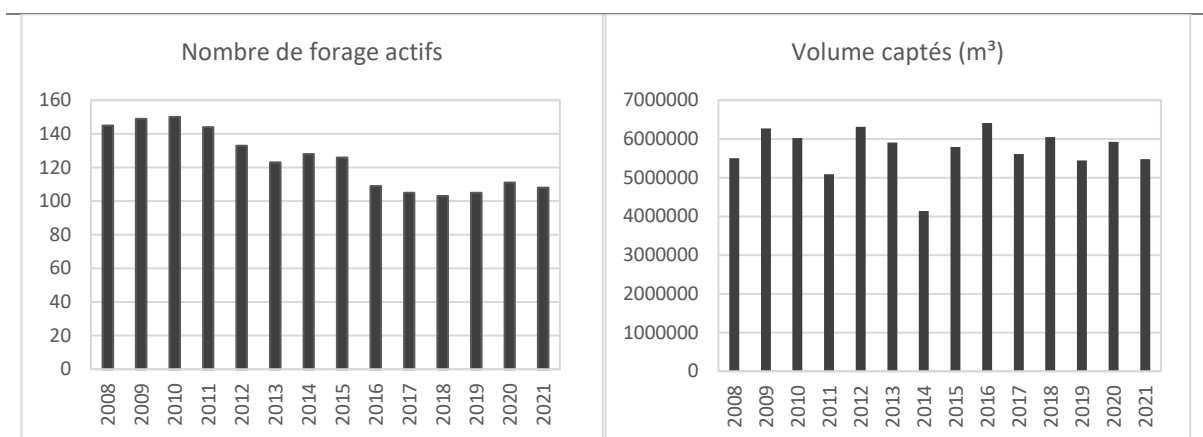


Figure 40: Volume captés annuels et nombres de forages actifs sur le bassin-versant des Autizes (Données : BNPE)

Nous pouvons observer sur les deux graphiques ci-dessus, que les volumes annuels ne montrent pas de tendance à la baisse entre 2008 et 2021, cependant le nombre de forage actifs diminue.

On retrouve dans les documents de préparation du SAGE SNMP des données relatives aux volumes annuels prélevés sur le bassin hydrographique de l'Autize et de son marais entre 1996 et 2001. Ils ont varié entre 9 et 7 M.m³, avec un maxima atteint en 1996 de 9 245 000 m³, dont plus de 14 % prélevé en dehors de la période d'été en raison d'une irrigation précoce des cultures (Safege, 2004). Avec un volume total autorisé annuel de l'ordre de 6.060.000 m³ sur l'ensemble des deux unités de gestions de l'Autize, été, hiver eaux de surfaces et eaux souterraines confondu, l'AUP autorise jusque 2026 un volume total qui n'a pas été atteint 10 années sur 14 entre 2008 et 2021 si l'on se fie aux données de la BNPE. On peut remarquer également que l'AUP autorise un volume qui est en deçà du volume total cumulé des réserves des Autizes, qui est de l'ordre de 3.394.000 m³.

III - 3.2. Répartition des volumes prélevés

Sur la carte ci-dessous, nous pouvons observer la répartition des points de prélèvements sur le secteur des Autizes avec une distinction entre prélèvement de surface et forages. On peut noter que les prélèvements d'eaux souterraines sont concentrés dans le secteur de plaine, au niveau de la zone de contact entre le Dogger et le marais, et semblent s'organiser selon un axe NE-SW parallèle à l'axe du réseau principal de failles. Les points avec les volumes les plus importants sont les prélèvements d'alimentation des réserves de substitutions. On retrouve également une série de prélèvement de surface, quelques points sont situés sur la tête de bassin, d'autres sur le cours central de l'Autize, et d'autres encore au niveau du secteur de marais sur les biefs et canaux.

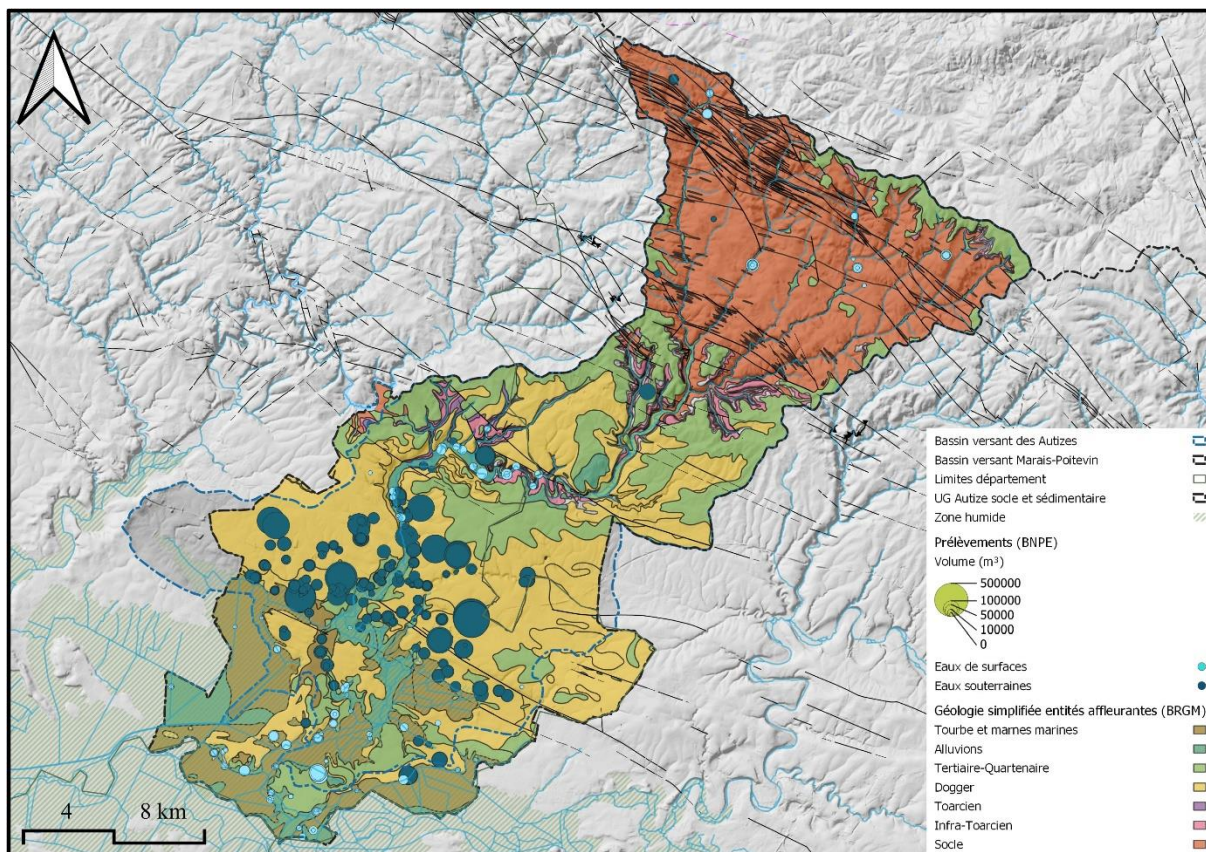


Figure 41 : Localisation des points de prélèvements, du type d'eau capté, et des volumes sur les unités de gestion des Autizes (Données : BNPE).

III - 4. Réserves de substitution

III - 4.1. Contexte

Les 10 réserves de substitution¹¹ du bassin versant des Autizes ont été mises en place entre 2007 et 2011 dans le cadre du programme des Autizes, parallèlement à la mise en œuvre d'une gestion collective de toutes les ressources en eau superficielles, souterraines et stockées pour le secteur agricole.

L'objectif principal était de mettre un terme aux inversions de flux dues aux inversions de gradient hydraulique, entre le marais et la nappe du Dogger, et de respecter un niveau piézométrique de crise fixé à 2.5 m. NGF au piézomètre d'Oulmes.

Différents objectifs spécifiques existaient selon les secteurs. « L'Autize amont », où il convenait de compenser les prélèvements directs dans la rivière et de maintenir un débit minimum (CACG, 2005). Le « secteur de plaine », où il était question d'assurer en priorité la substitution des prélèvements situés aux abords directs de la périphérie du marais pour respecter l'objectif piézométrique de 2,5m NGF, répartir les réserves sur l'ensemble du périmètre afin d'éviter les rabattements localisés, et se concentrer spécifiquement sur le secteur de Bouillé-Courdault, sur lequel il existe de nombreuses sources et résurgences (CACG, 2005). Et le « secteur du marais », sur lequel il s'agissait de délester les biefs de canaux les plus sujets à la pression d'irrigation (CACG, 2005).

¹¹ Un projet de barrage techniquement et économiquement viable avait été envisagé sur le secteur des Autizes, le site de Mortay (30 M.m³), qui aurait été justifié par le développement rapide de surfaces irriguées pour lesquels les ressources existantes étaient jugées suffisantes (CACG, 2005).

III - 4.2. Description des ouvrages

III - 4.2.1. Localisation

La localisation des réserves de substitutions du secteur des Autizes est représentée sur la carte **ci-dessous**, ainsi que leurs points de prélèvements et le type d'eau mobilisé (souterraine ou de surface). Les réserves sont majoritairement situées dans le secteur de plaine et en périphérie du Marais. Les réserves de Damvix et de Mazeau se situent en Marais asséchés en périphérie direct du Marais mouillé.

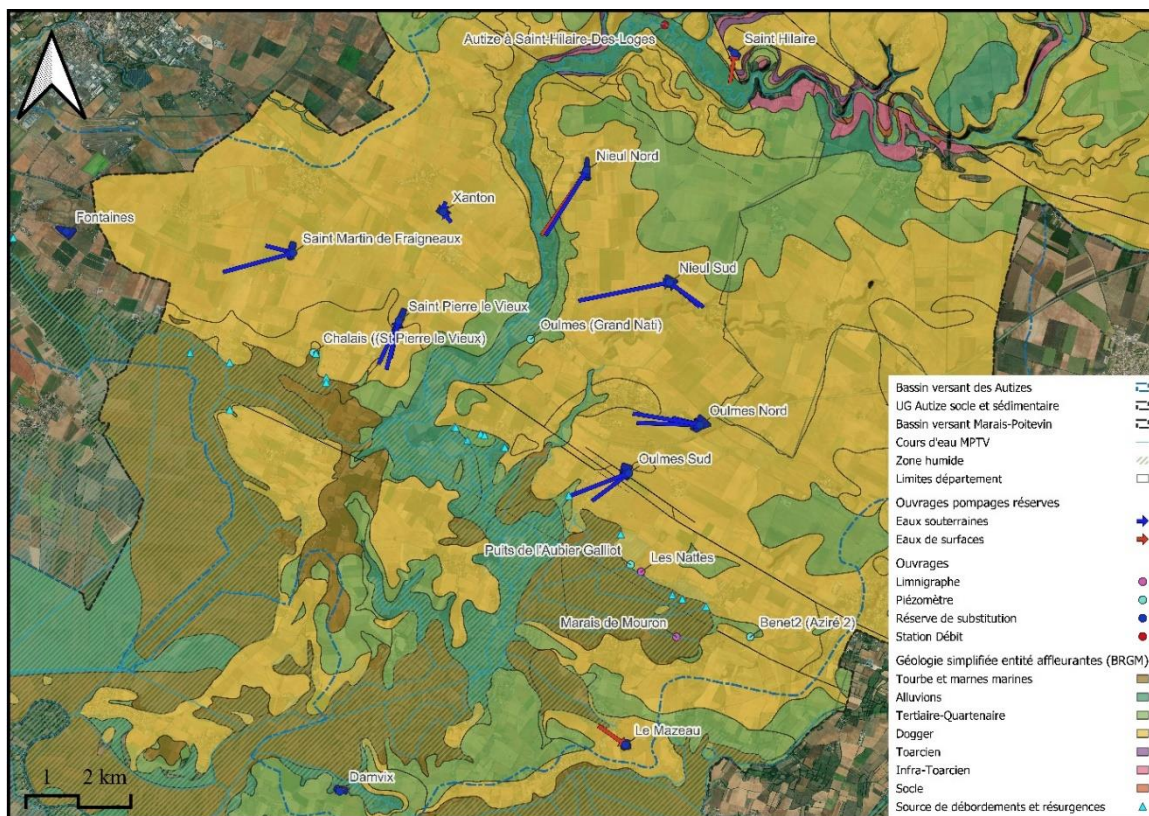


Figure 42: Localisation des réserves de substitutions du secteur des Autizes et des points de prélèvements (Données : SIEMP, AUP 2021, Douez et al., 2010).

III - 4.2.2. Caractéristiques

Les caractéristiques des réserves, leur volumes, superficies et ouvrages de prélèvements sont détaillés dans le tableau ci-dessous. Les aspects techniques des réserves de substitutions du secteur des Autizes sont détaillés plus en profondeur en annexe (au point 5).

Sur les 10 réserves, 7 sont remplies par l'intermédiaire de 16 ouvrages captant les eaux du Dogger (dont 3 ouvrages de secours). La réserve de Nieul Nord est remplie par deux pompes, une prélevant en eau de surface (dans le cours de l'Autize) et une autre en eau souterraine, sans que soit précisé la répartition des volumes pompés entre les deux. Trois autres retenues sont entièrement remplies par des ouvrages captant des eaux de surface : la réserve de Saint-Hilaire des Loges est remplie par un prélèvement directement dans l'Autize, tandis que les réserves de Mazeau et Damvix sont remplies par des prélèvements dans des canaux du Marais Mouillé, respectivement dans un canal du Marais pour Mazeau, et dans le Canal de Reth pour Damvix (Lanoisellee, 2021).

Nom Retenue	Prélèvement	Volume Max. (m³)	Volume Total (m³)	Volume Utile (m³)	Nom du Forage	Débit (m³/h)	Nbr agriculteur	Surface du plan d'eau (hectare)
Damvix	ESU	142030	141000	136700	Cours d'eau		3	3.04
Le Mazeau	ESU	155880	162000	149000	R102-Cours d'eau		6	3.67
Nieul Nord	ESU/ESO	384120	390000	380000	R120-Cours d'eau	100	5	4.94
					F8118	100		
Nieul Sud	ESO	337300	344600	335450	F139	80	6	4.19
					F1193 (secours)			
					FI 1192	120		
Oulmes Nord	ESO	659350	709000	659350	F1241	130	6	6.95
					F255 (secours)	130		
					F55	100		
Oulmes Sud	ESO	374670	356000	338000	F1303	100	4	5.01
					F 165	100		
Saint-Hilaire	ESU	172370	182000	174000	Cours d'eau		4	2.8
Saint-Martin de Fraigneau	ESO	377730	371000	352000	F4165	100	7	4.19
					F171	100		
St-Pierre-le-Vieux	ESO	484010	495800	481560	F25	130	9	5.5
					F1292 (secours)			
					F1231	130		
Xanton	ESO	234645	243000	233000	F48	80	4	5.44
					F161	80		
Total		3.322.105	3.394.400	3.239.060		1500	54	45.73

Tableau 8 : : Description des réserves de substitutions des Autizes (Données : SIEMP, AUP 2021, CACG (2005).

Sur le secteur des Autizes en 2005 on comptabilisait 117 exploitations irrigants, réparties sur les trois secteurs : la partie amont, la partie intermédiaire, zone de plaine, et le secteur Sud, zone de marais. (CACG, 2005). Il y a 54 agriculteurs reliés aux réserves.

La construction, et le réseau de distribution et de pompages des 10 réserves de substitutions, totalisant un volume de 3,2 M.m³, ont eu un coût total de 16 millions d'euros, ce qui revient à 5.13 € HT/m³, dont un quart est consacré au système de remplissage et de distribution (Lanoiselée, 2021).

III - 4.3. Gestion

Les prélèvements pour le remplissage des réserves sont autorisés du premier novembre au 31 mars selon un seuil de niveau piézométrique fixé au piézomètre du Grand Nati à 4 m NGF de novembre à février et à 4.6 m. NGF en mars et un seuil de débit de l'Autize à St-Hilaire-des-Loges de 0.45 m³/s.

On a pu observer un dépassement des conditions d'exploitation réglementaire en 2017, à la suite d'une faible pluviométrie de l'hiver 2016-2017 qui a compromis le remplissage optimal de plusieurs retenues, un arrêté préfectoral (AP n°17-DDTM85-205) a temporairement modifié les conditions de remplissage des retenues. Ainsi pour la réserve de Nieul Sud, le remplissage s'est prolongé jusqu'au 4 avril (Lanoiselée, 2021).

III - 4.3.1. Seuil de remplissage

Nous pouvons remarquer sur les figures ci-dessous que les seuils de remplissages au Grand-Nati se situent en dessous des niveaux minimums pratiquement jamais atteint entre janvier et mars et 2 à 3 mètres en dessous des maximas, suivant les années. On peut noter également, que les seuils de remplissage au piézomètre du Grand-Nati correspondent à des débits journaliers généralement inférieur à 0.5 m³/s.

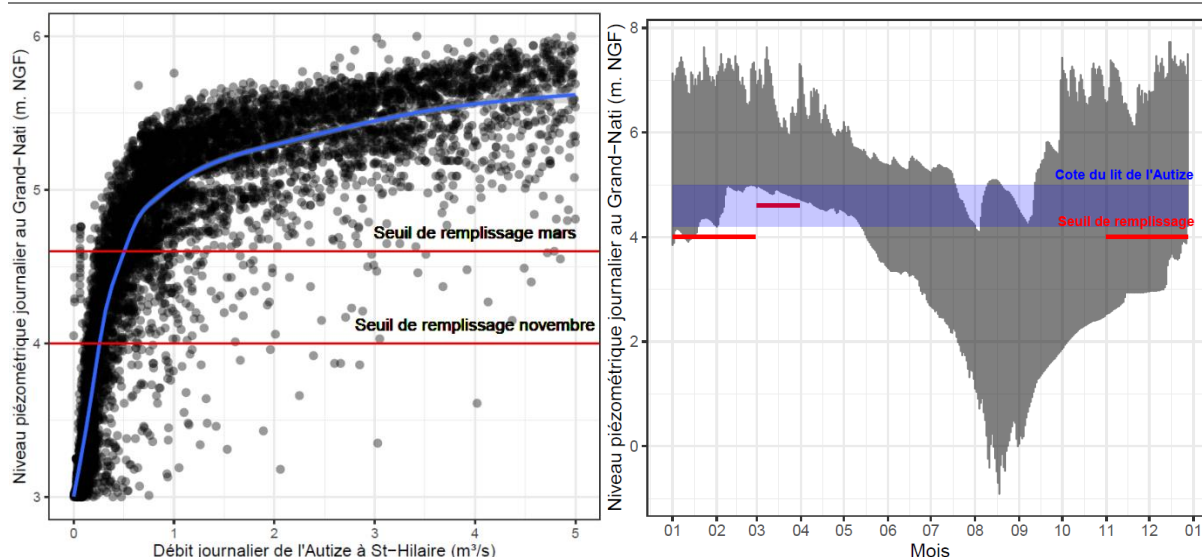


Figure 43: Seuil de remplissage des réserves de substitutions des secteurs des Autizes sur le piézomètre du Grand-Nati (Données : ADES et HydroPortail).

III - 4.4. Impact quantitatif

Les prélèvements hivernaux en nappe et en rivière entraînent une série d'impacts sur le système hydrologique qu'il s'agit d'identifier et de quantifier. Nous allons passer en revue les impacts probables et les effets qui ont été estimés par modélisation, avant de présenter des éléments sur les impacts observés.

III - 4.4.1. Impacts potentiels

Dans une note d'orientation méthodologique visant à élaborer un outil de gestion qui permettent de déterminer les impacts de la mise en œuvre d'ouvrages de substitutions, et de fixer un seuil au-delà duquel de nouveaux projets mettraient à mal la coexistence des différents usages de l'eau, le BRGM propose une approche hydrologique et hydrogéologique globale (Normand et Lavie, 2001).

Le principe de substitution implique la mobilisation de volumes qui seraient potentiellement sortis du système hydrologique, les prélèvements doivent garantir l'existence d'un débit minimum des eaux souterraines pour les nappes qui sont drainées par des rivières et pour éviter la remontée du biseau salé pour les nappes qui s'écoulent vers la mer (Normand et Lavie, 2001).

Les prélèvements en eaux de surface en période hivernale peuvent impacter en partie le volume des crues et donc des conditions de recharge des aquifères par les crues en aval, tandis que les rabattements provoqués par les prélèvements en eaux souterraines peuvent favoriser de manière localisée l'infiltration et les échanges d'eau depuis les cours d'eau vers les nappes (Normand et Lavie, 2001).

Les longues périodes de stockage et la faible hauteur d'eau des eaux, entraînent des pertes par évaporation de la surface d'eau libre qui pourrait être de l'ordre de 10% du volume (Normand et Lavie, 2001). On peut s'attendre donc à une diminution de l'efficacité liée à ces pertes par évaporation mais également aux pertes du réseau de distribution et de pompages, qui peuvent amener à devoir stocker un volume plus important pour un même volume net utilisé en substitution qu'en situation de prélèvement direct.

Enfin, il est possible qu'on observe un phénomène de salinisation des sols, avec des cycles de pompages, stockage, évaporation et lessivage des sols et des impacts sur la qualité de l'eau stockée qui dépendront des conditions climatiques et surtout de la qualité initiale de la ressource en eau utilisée (Normand et Lavie, 2001).

Selon Thinon-Larminach et Bichot (2013) un prélèvement en forage peut avoir des effets non négligeables sur les débits et les niveaux piézométriques avec un décalage qui va varier en fonction de l'inertie et des valeurs de transmissivité de la nappe concernée. L'impact maximal d'un prélèvement peut être décalé d'1 à 2 mois pour le Jurassique supérieur fissuré qui a pourtant une très faible inertie, avec des transmissivités de l'ordre de $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, ainsi un pompage en avril peut avoir un impact non nul décalé en juin sur le débit de la rivière (Thinon-Larminach et Bichot, 2013).

De manière générale, on peut s'attendre à ce que les nappes avec les plus fortes inerties que les prélèvements hivernaux des retenues de substitutions puissent impacter de manière significative les débits des rivières en période estivale d'étiage. Et lors d'hiver particulièrement sec, le remplissage hivernal peut avoir un impact significatif sur les nappes comme sur les rivières.

III - 4.5. Etudes d'impacts

Pour les réserves de substitutions du secteur des Autizes, deux études d'impact ont été réalisées. La CACG a réalisé une étude en 2005 dans le cadre de l'enquête publique liée aux projets de retenues du secteur des Autizes. En 2010 le BRGM a également présenté des éléments sur les impacts des retenues estimés par modélisation (i.e. à posteriori de leurs mises en place).

III - 4.5.1. CACG

Le bureau d'étude de la CACG a réalisé plusieurs simulations par modélisation selon différents scénarios de prélèvement : l'hypothèse témoin qui correspondait à la situation alors, et l'hypothèse projet, dans laquelle 50% des prélèvements estivaux sont prélevés en période hivernal. La CACG estime sur base des résultats de la modélisation que les gains de la répartition des prélèvements dans l'hypothèse du projet de substitutions seraient compris selon les années entre 2 et 4 m, avec une relation « grossièrement linéaire », avec un gain « moyen » espéré de 3 m. pour 3 M.m^3 , soit « un ordre de grandeur de 1 m. par M.m^3 » (CACG, 2005, p.s 15).

Au niveau des impacts des prélèvements hivernaux sur les niveaux piézométriques au Grand-Nati, les auteurs avancent des résultats assez peu marqués de l'ordre de 0.1 à 0.2m pour des années avec forte recharge comme l'année 93-94 (estimée à 581 mm), et des rabattements de l'ordre de 0.5 à 1m qui s'atténuent mais restent perceptibles jusqu'à la fin mai, pour des années à plus faible recharge comme l'année 91-92 (estimée à 224 mm) (CACG, 2005).

Une autre indication relevée par le bureau d'étude et maître d'œuvre délégataire, est que des prélèvements hivernaux plus importants que ceux prévus (qui étaient limités à 50% des volumes consommés), risqueraient de provoquer des rabattements hivernaux qui dépasseraient plus régulièrement le seuil de remplissage prévu à 4m NGF au piézomètre du Grand-Nati, qui ne devait être dépassé que les années exceptionnellement déficitaires (CACG, 2005).

Enfin, les auteurs précisent, que les simulations ont montrées qu'il était préférable de mobiliser les eaux de surface en période hivernale pour alimenter les pompages, et c'est pourquoi le projet fait appel au

réseau superficiel lorsque les réservoirs sont suffisamment proches. Les prélèvements du remplissage hivernal entraîneraient un débit instantané cumulé de 0.18 m³/s, ce qui équivaldrait à 9.5% du module annuel et 4 à 6 % du débit mensuel quinquennal (CACG, 2005).

III - 4.5.2. BRGM

Le rapport 58297-FR du BRGM (2010) sur la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin présente également une simulation de l'impact des prélèvements hivernaux pour le remplissage des réserves présentes sur le secteur des Autize. Les auteurs précisent que les retenues remplies par des prélèvements en surface n'ont pas été prises en compte (Douez et al., 2010). Les volumes intégrés pour le secteur des Autizes sont de 2.78 M. m³ (sur un total de 3.4 M. m³), et la période de comparaison, avec ou sans prélèvements hivernaux est de 2000 à 2007.

Globalement, selon Douez (2012), en valeurs moyennes mensuelles, les résultats montrent une forte amélioration des niveaux piézométriques des nappes concernées et un impact très faible du remplissage hivernal sauf pour les années à hiver sec. Un gain de +1 à +3 m pour le Dogger et jusqu'à +5 mètres pour l'Infra-Toarcien dans certains secteurs. Plus de détails concernant les résultats de la modélisation sont donnés en annexe (au point 6).

Le remplissage des retenues était initialement prévu pour être réparti entre janvier, février et mars à égalité des volumes et au prorata des débits autorisés. Les résultats des deux premières simulations ne correspondaient pas aux espérances du SMVSA, les scénarios de ventilations et volumes des prélèvements ne donnant pas des impacts satisfaisants, et des nouvelles simulations ont été réalisées. Une troisième simulation a été réalisée sur un scénario où 80% des volumes autorisés étaient consommés et dans lequel le remplissage des réserves s'étendait sur 5 mois au lieu de 3, et cela a nettement contribué à améliorer les résultats en lissant notamment l'impact du remplissage (Douez et al., 2010). On peut noter ici l'importance de l'étalement des prélèvements sur l'entièreté des 5 mois.

III - 4.6. Effets observés

La CACG a communiqué des valeurs concernant l'évaporation net de l'eau des réserves de substitution du secteur vendéen de l'ordre de 3% à 4% du volume total stocké (Coop de l'eau 79, 2017). Cependant, il apparaît que ces valeurs restent difficiles à interpréter. Il s'agirait en fait d'un bilan précipitation-évaporation et seulement sur la période estivale. Une analyse plus poussée de ces bilans et des variations temporelles (annuelles ou mieux, saisonnières) ainsi qu'un suivi direct des flux évaporés sont nécessaires.

Nous présentons des éléments concernant la qualité de l'eau des réserves de substitution en annexe (au point 7).

Quelques éléments sont apportés ci-dessous concernant les effets des prélèvements hivernaux que nous pouvons observer sur la piézométrie et les niveaux d'eaux dans le marais. Cependant, étudier les impacts des remplissages hivernaux sur les débits de l'Autize, c'est avéré particulièrement complexe car l'unique station de mesure des débits de St-Hilaire est située en amont de toutes les réserves.

III - 4.6.1. Impact sur la piézométrie

Dans le cadre d'une rencontre lors d'une mission de deux ingénieurs mandatés par les ministres de l'agriculture et du développement durable, l'EPMP a fait part de l'impact positif des retenues sur le secteur des Autizes, un retard d'un mois de la période d'étiage et une réduction de 30 cm de la baisse des niveaux dans le Marais Poitevin, ainsi qu'une absence des baisses des niveaux en hiver (Ayphassorho et Renoult, 2018).

Les chroniques du piézomètre du Grand-Nati avant et après 2010 (année de mise en marche de la majorité des réserves sur les Autizes) sont représentées sur la figure ci-dessous. Nous pouvons remarquer que les niveaux estivaux se sont maintenus sans exception au-dessus de la cote de 2.5 m NGF. après 2010. Au niveau des valeurs médianes, avant 2010, c'était durant le mois d'octobre qu'on observait la principale réhausse, de plus de 2m entre le début et la fin du mois. Après 2010, ce n'est que à partir de début novembre que les niveaux médians augmentent significativement, et l'on peut retrouver des niveaux inférieurs à 4m NGF encore durant le mois de décembre.

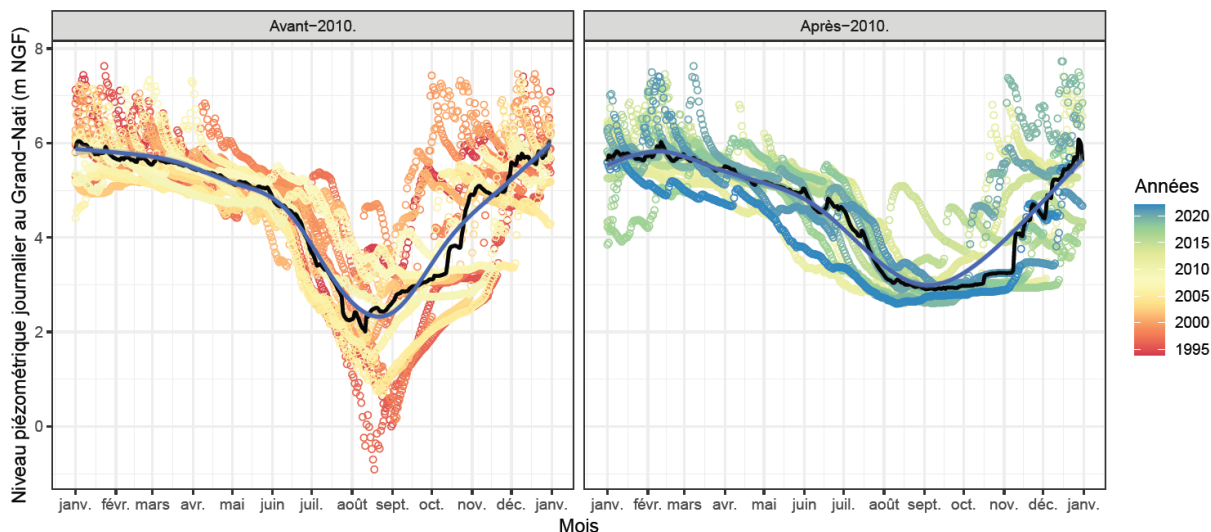


Figure 44 : Chroniques piézométriques annuelles au Grand-Nati avant-après 2010. La courbe noire représente les valeurs médianes journalières et la courbe bleu est une courbe lisse calculée par régression locale. (Données : ADES).

Il est complexe de départager ce qui de la mise en place de la substitution ou de la mise en place de la gestion collective des prélèvements, de la police de l'eau et l'interdiction des prélèvements au-delà des seuils de crises, a permis une amélioration assez nette vis-à-vis du dépassement des seuils de crise à partir de 2008-2010 (Ayphassorho et Renoult, 2018).

La mise en place des réserves a été conditionnée à la réhausse des seuils de crises. Comme il l'est précisé dans l'arrêté de la direction départemental de l'agriculture et de la forêt de la Vendée du 11 janvier 2006 (n°06-DDAF-5), sur l'autorisation des 10 réserves de substitutions : « La mise en œuvre du projet implique une remontée progressive de la cote d'arrêt qui ne pourra, en tout état de cause, être inférieure à 2,50 m NGF au piézomètre du Grand-Nati à OULMES, et ceci pour l'année 2009 ».

III - 4.6.2. Impact localisé sur les niveaux d'eau du Marais mouillé

Au niveau des impacts quantitatifs localisés, nous pouvons nous concentrer sur le secteur du marais de la Vielle-Autize, où l'on dispose de données piézométriques sur un puits situé à proximité directe d'un limnigraphe sur un bief périphérique. Avec les figures ci-dessous, nous pouvons comparer l'évolution des niveaux piézométriques du puits de l'Aubier-Galliot et d'Aziré avec la hauteur d'eau du marais des Nattes en relation avec les prélèvements pour le remplissage de la réserve d'Oulmes Sud durant les hivers 2014-2015 et 2022-2023.

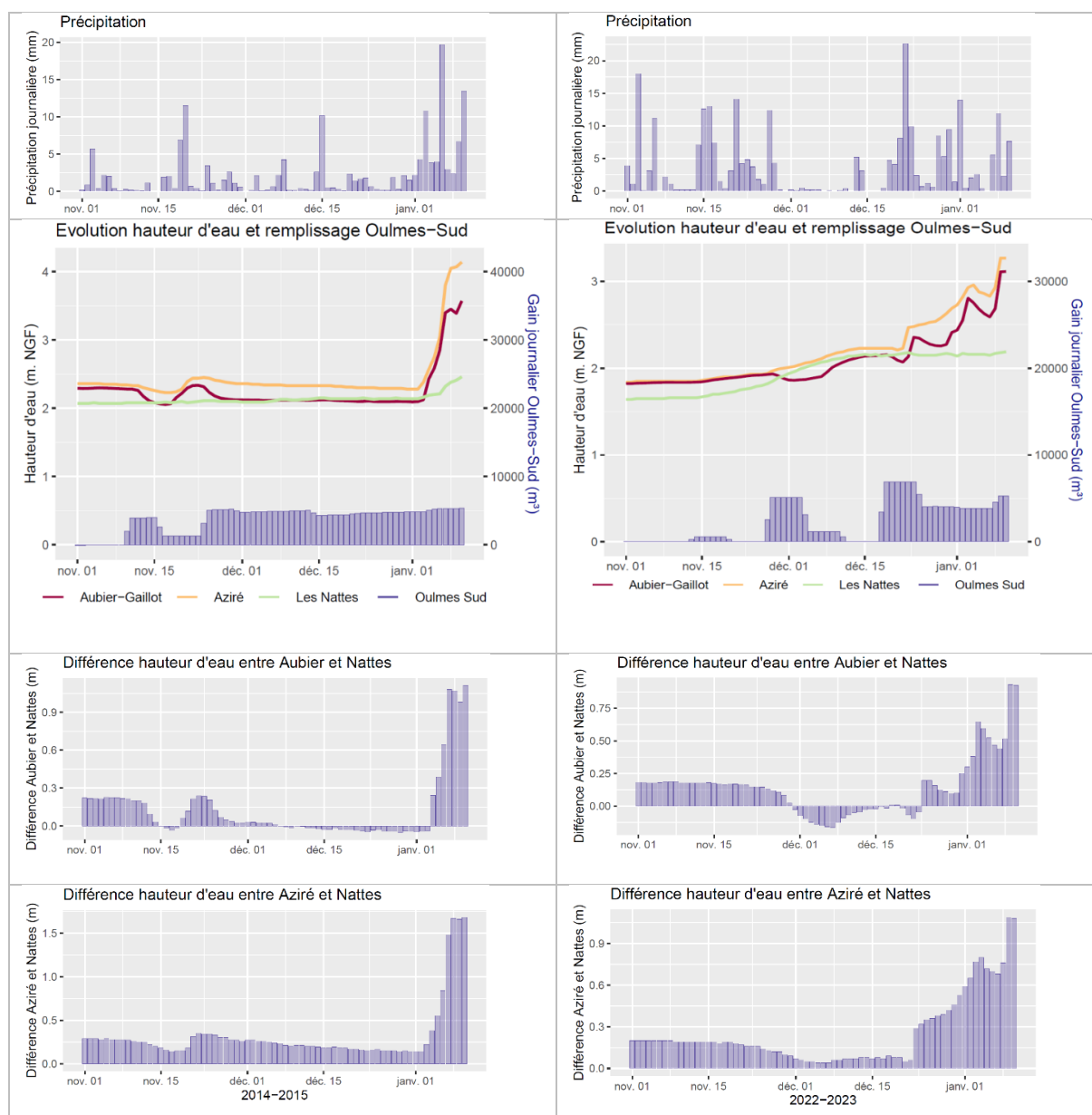


Figure 45: Relation entre les pompages pour le remplissage de la réserve d'Oulmes Sud et le niveau d'eau du marais des Nattes, du puits de l'Aubier Gaillot et du piézomètre d'Aziré (Benet). (Données : ADES, SIEMP, Safran).

On observe que l'enclenchement des prélèvements pour la réserve d'Oulmes Sud peut entraîner un rabattement localisé. Ces prélèvements peuvent maintenir ou rabattre légèrement le niveau de l'Aubier Gaillot et d'Aziré certaines années, malgré des précipitations conséquentes, et ainsi entraîner de légères inversions du gradient hydraulique entre les niveaux de la nappe de bordure et le réseau d'eaux superficielles des biefs du Marais mouillé en période hivernale.

Ainsi, on remarque que le seuil de remplissage à 4m NGF au Grand-Nati, ne garantit pas nécessairement l'absence de flux inverses. Les gestionnaires sont amenés à surveiller d'autres indicateurs pour coordonner la gestion des prélèvements, prélèvements qui doivent parfois être interrompus ou diminués en cours de saison selon les réserves et leurs impacts localisés.

III - 5. Evolution des volumes et de la dynamique de remplissage et de vidange des réserves de substitutions

Nous pouvons nous intéresser à l'évolution de la dynamique du remplissage et de l'usage de l'eau des réserves de substitution sur le secteur des Autizes, pour lequel on dispose d'une dizaine d'années de chroniques. Globalement, on constate que les périodes de prélèvements sont bien respectées, on constate des exceptions dont on ne connaît pas la cause. Les données de volumes sur lesquelles nous nous sommes basées sont produites par le gestionnaire en agrégeant plusieurs sources de mesures différentes, ainsi, il faut prendre avec du recul ces données qui ont une précision relative.

III - 5.1. Volume mensuel

Sur la figure ci-dessous, l'évolution interannuelle des gains et des pertes mensuels cumulés de l'ensemble des réserves des Autizes est représentée en parallèle au déficit hydrique climatique mensuel (P-ETP). On peut remarquer des variations assez significatives d'une année à l'autre à la fois au niveau des remplissages et au niveau des vidanges ¹². Les pics de volumes utilisés correspondent généralement aux mois avec le plus grand déficit hydrique climatique. On observe également l'apparition d'un deuxième pic d'utilisation de l'eau des réserves au cours des trois dernières années, en avance d'un à trois mois.

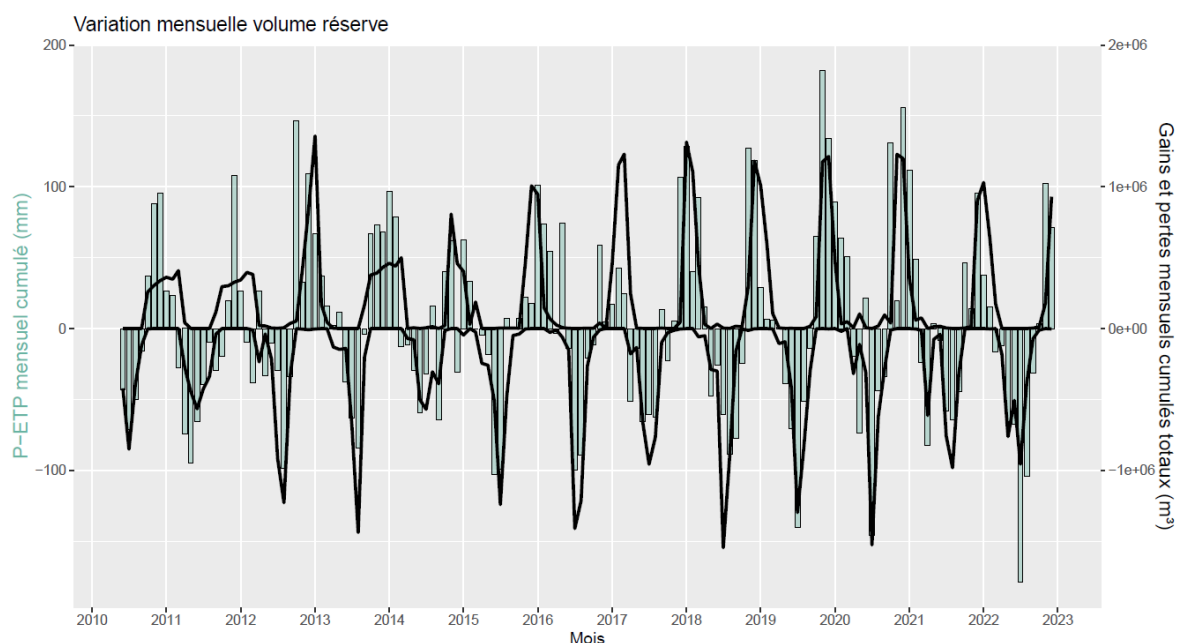


Figure 46: Evolution interannuelle des variations de volumes cumulés mensuels sur l'ensemble des réserves des Autizes (courbe noire) en parallèle avec le déficit hydrique climatique mensuel (P-ETP) en bleu clair (Données : SIEMP et Safran).

L'évolution annuelle du remplissage et de l'utilisation de l'eau des réserves de substitution des Autizes est représentée en volume cumulé mensuel sur les figures ci-dessous. On peut observer des variations à la fois en termes de volume total annuel prélevé et utilisé, mais aussi en termes de dynamique de prélèvement.

On observe également un décalage dans l'année au niveau des gains (prélèvements), avec un début des remplissages plus tardif pour les années 2016 à 2018 et plus précoce pour les années 2019-2020.

¹² C'est à partir de 2012 que l'ensemble des réserves entrent en fonctionnement sur le territoire.

Nous pouvons remarquer au niveau des gains un redressement de la pente des courbes entre les années 2010 à 2014 et 2015 à 2022, ce qui traduit une concentration des prélèvements dans le temps.

Au niveau des pertes (utilisations), on retrouve une utilisation plus précoce pour les années 2019-2020 et 2021-2022. On observe également que l'entièreté du volumes des réserves n'est pas consommé chaque année, ce qui peut être dû notamment à des restrictions d'usages durant la saison d'irrigation.

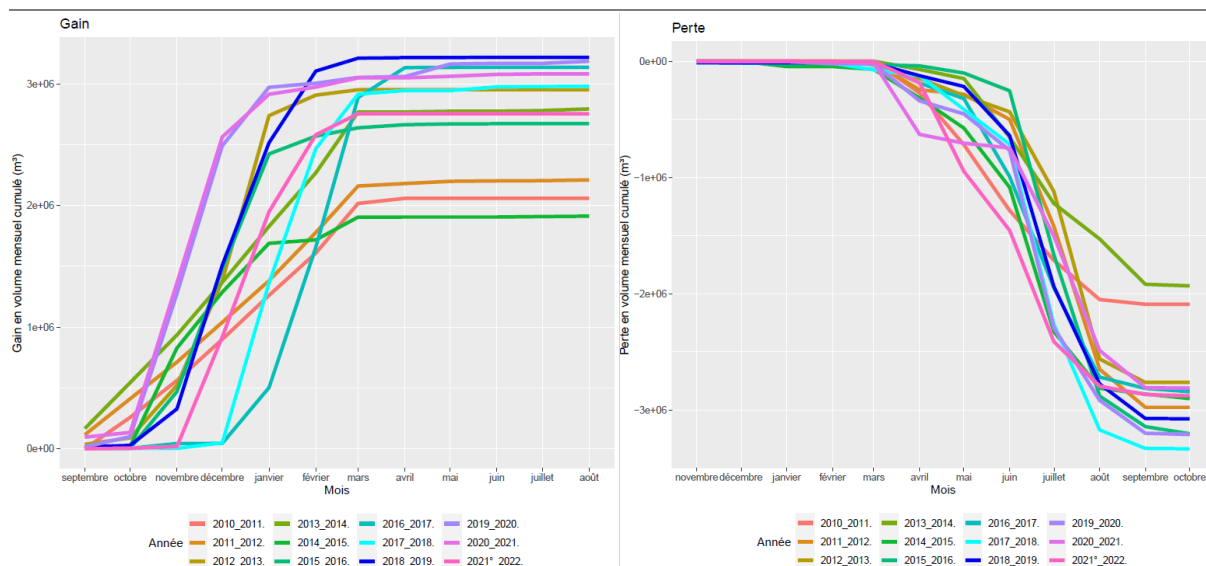


Figure 47: Evolution intra-annuelle des variations de volumes cumulés mensuels sur l'ensemble des réserves des Autizes (Données : SIEMP).

III - 5.2. Volume journalier

Sur la figure ci-dessous, nous pouvons observer la répartition des prélèvements journaliers pour chaque année en volume cumulé sur l'ensemble des réserves des Autizes. On remarque globalement une évolution vers une plus grande concentration des prélèvements dans le temps. Certaines années, comme 2017 et 2018 les prélèvements n'ont pu réellement commencer qu'à partir du mois de janvier. En 2021 et 2022 également le niveau au Grand-Nati est resté sous le seuil de remplissage durant tout le mois de novembre. On peut observer, des interruptions dans les chroniques annuelles de prélèvements, qui ont lieu au cours des mois de novembre, décembre ou janvier.

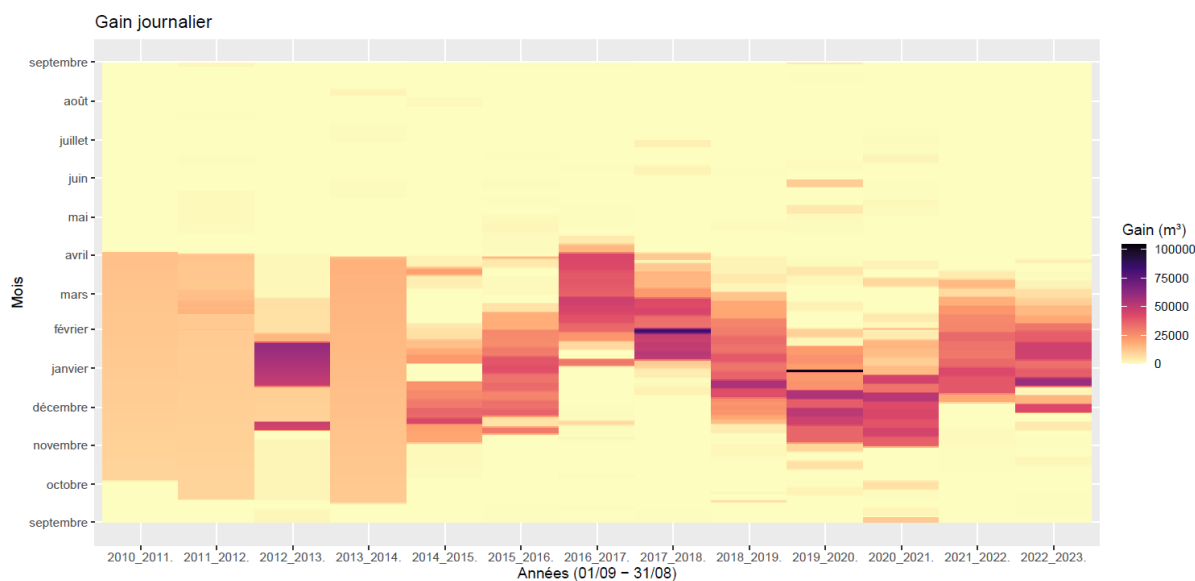


Figure 48 : Gain journalier de l'ensemble des réserves du secteur des Autizes (Données : SIEMP).

Avec la figure ci-dessous, nous pouvons observer en parallèle aux évolutions des gains, l'évolution des jours où le niveau du piézomètre du Grand-Nati est situé en dessous du seuil de remplissage. Le mois de novembre est le plus concerné, certaines années le niveau piézométrique reste sous le seuil durant le mois.

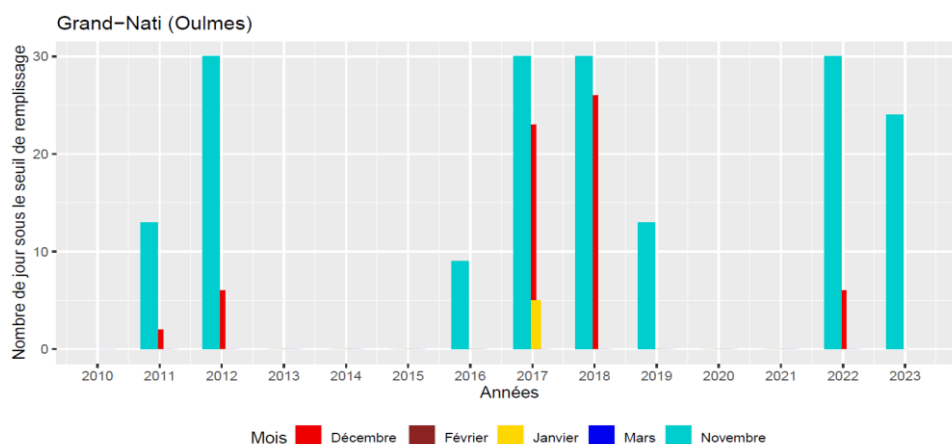


Figure 49: Nombre de jours sous le seuil d'autorisation du remplissage au piézomètre du Grand-Nati (Données : ADES).

Au niveau de l'évolution de l'utilisation de l'eau en volumes journaliers (figure ci-dessous), nous observons des maxima journaliers qui interviennent plus tôt dans la saison, tout d'abord en août, puis, de façon plus fréquente en juillet.

Globalement, on observe que la saison d'irrigation est surtout concentrée entre les mois de juin, juillet et août. On peut remarquer également des périodes de coupures qui arrivent parfois entre juin et septembre et sont probablement liées à des arrêts sécheresse générant des restrictions.



Figure 50: Evolution journalière négative du volume de l'ensemble des réserves du secteur des Autizes interprétées comme un usage de l'eau des réserves (Données : SIEMP).

III - 5.3. Evolution du nombre de jour sous les seuils de remplissage

Sur la figure ci-dessous est représenté l'évolution du nombre de jours pour lesquels le niveau piézométrique au Grand-Nati et le débit de l'Autize enregistré à St-Hilaire est en dessous du seuil de remplissage, sur la période de remplissage de novembre à mars (151 jours). Des tests non paramétriques de Mann-Kendall ont été appliqués aux distributions. On observe une tendance

significative à la hausse, avec un seuil de significativité de 0.1 et un tau de Kendall positif de 0.2, pour le nombre de jour sous le seuil au Grand-Nati, et une tendance non significative pour les débits à St-Hilaire. On observe de plus en plus de dépassement de seuil, ce que l'on peut relier à des sécheresses récurrentes, et qu'on peut interpréter comme une tendance compatible avec les projections climatiques. Ceci peut laisser à penser que les retenues de substitution sont moins adaptées dans un climat qui change dans la mesure où les opportunités de remplissage diminuent.

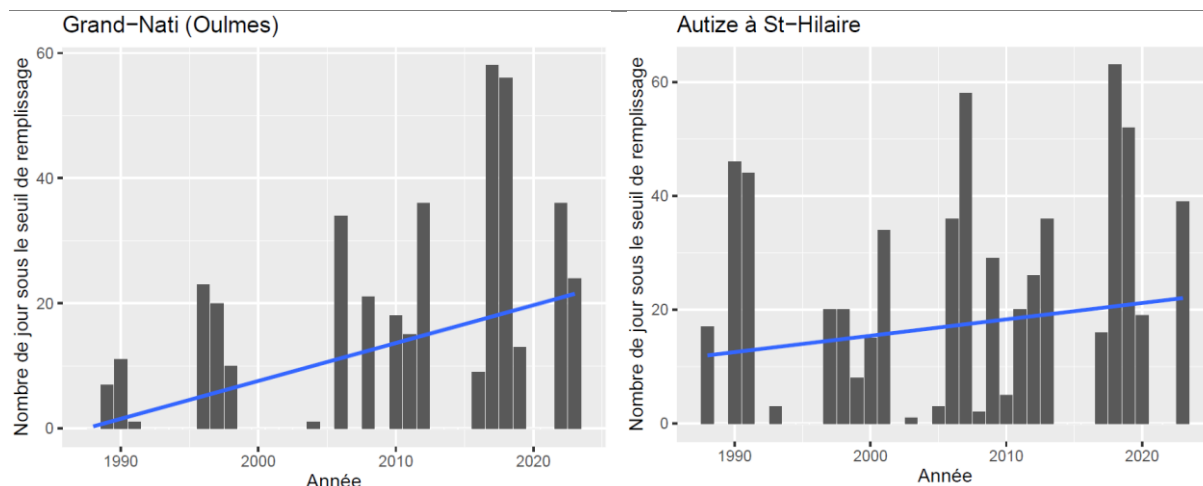


Figure 51: Evolution du nombre de jour sous le seuil de remplissage au piézomètre du Grand-Nati et à la station de débit de l'Autize à St-Hilaire, pour les mois de novembre à mars (Données : HydroPortail et ADES)

Compère et Thinon-Larminach (2021) ont réalisé une étude de reconstitution et caractérisation des régimes hydrologiques naturels et d'impact du changement climatique sur base du modèle global à réservoirs GARDENIA. Leurs résultats, en régime non influencé par les prélèvements, montrent un recul dans l'année du jour où le niveau piézométrique minimum est atteint pour le piézomètre du Grand-Nati, de l'ordre d'une vingtaine de jour entre 2000 et 2100 (Compère et Thinon-Larminach, 2021).

III - 5.4. Synthèse des éléments clés

Les modifications majeures de l'implantation des réserves de substitution sur le secteur des Autizes concernent la dynamique des prélèvements et leurs répartition à la fois spatiale et temporelle. Si l'on peut observer un étalement des prélèvements sur l'ensemble de l'année c'est aussi une concentration dans l'espace que l'on observe.

Au niveau des prélèvements hivernaux il semble se démarquer une tendance à la concentration dans le temps, l'on est passé de prélèvements uniformément répartis sur la période de remplissage à une gestion plus fine avec parfois des interruptions marquées sur plusieurs semaines. Au niveau des possibilités de remplissage on observe une tendance à l'augmentation du nombre de jour en période hivernale sous le seuil piézométrique de remplissage fixé au Grand-Nati (tendance qui peut justement être en partie influencée par les remplissage hivernaux).

Nous avons également remarqué que les prélèvements hivernaux de la réserve d'Oulmes Sud pouvaient provoquer localement des inversions du gradient entre la nappe et le Marais mouillé. Enfin, au niveau de la dynamique des niveaux piézométriques au Grand-Nati, nous avons pu noter que les années post 2010 présentent une recharge qui est décalée d'environ un mois en comparaison aux années antérieures à 2010.

IV - Modélisation de l'évolution des besoins en eau agricoles

IV - 1. Contexte

Une des dernières perspectives d'études de la Commission Locale de l'Eau du SAGE Sèvre-Niortaise et Marais poitevin, est la modélisation de l'impact du changement climatique sur la demande en eau des cultures, dans une perspective où les pratiques agricoles actuelles n'évoluent pas.

Jusqu'ici nous nous sommes intéressés à la situation hydrogéologique historique et actuelle, nous avons étudié les projets et le cadre de gestion qui ont été mis en place afin d'orienter le territoire vers un équilibre entre les ressources, les prélèvements et les besoins du milieu. Nous pouvons également nous questionner au sujet de l'évolution des besoins agricoles (la demande) ainsi que des ressources, (l'offre) dans un contexte de changement climatique pour un futur proche et lointain.

Les besoins en eau des cultures peuvent être estimées selon l'évapotranspiration maximal (ETM) potentielle, qui dépend du coefficient cultural (kc) propre à chaque culture et variable selon le stade de développement, qui est donc proportionnelle à l'ETP.

Les déficits en eau des principales cultures sur le secteur de la Sèvre-Niortaise sont estimées dans le tableau ci-dessous pour des sols moyens. On remarque que c'est principalement la période à laquelle les besoins des cultures sont les plus importants qui va déterminer l'ampleur du déficit en eau et la demande d'apport d'eau supplémentaire. En effet, si les besoins totaux du blé d'hiver et du maïs sont relativement proches, ceux du maïs se situent entre la mi-juin et la mi-septembre, à une période qui est caractérisée par un déficit hydrique prononcé.

Cultures	Besoin totaux (m³/ha)	Besoin d'été (m³/ha)	Déficit en eau (une année sur 2), en sol moyen (m³/ha)
Blé d'hiver	5 500	Du 15/03 au 15/06 3 600	500
Tournesol	4 900	Du 01/06 au 01/09 2 800	1 800
Maïs	5 900	Du 15/06 au 15/09 3 800	2 300

Tableau 9 : Besoin en eau des principales cultures selon les ETM (Chambre d'Agriculture 79 in (Safege, 2004).

Il faut différencier des périodes sensibles pour lesquelles le manque d'eau peut affecter la croissance (taille, longueur) sans avoir d'incidence forte sur le rendement des cultures, et des périodes plus critiques pour lesquels un déficit hydrique va avoir de plus fortes conséquences (absence de fécondation, chute de fleurs et avortement) qui correspondent en général à la période de floraison (Safege, 2004).

Pour le maïs plus spécifiquement, les volumes d'irrigations pour les régions de Poitou-Charentes et Pays de la Loire vont de 180 m³/ha (ou mm/m²) pour des terres de limons profonds au réserves utiles supérieur à 150 mm, à 270 m³/ha pour des groies moyennes développant des réserves utiles de 70 mm (Arvalis, 2006).

IV - 2. Evolutions prévisibles et état de l'art

IV - 2.1. Perspectives générales

On peut anticiper de nombreux effets du changement climatique sur l'agriculture, des processus souvent contradictoires vont influencer positivement ou négativement les rendements agricoles et les besoins en eau des cultures. Dans le cadre du projet CLIMATOR (2010) de nombreuses équipes de recherches ont réalisé un exercice de prospective des impacts du changement climatique sur les cultures de l'ensemble de la France, en terme environnemental et de production, en combinant des modèles climatiques et agronomiques. Nous pouvons nous reposer sur leurs résultats afin de tracer les grandes lignes des processus qui entrent en jeu dans cette problématique.

Les mécanismes physiologiques des plantes sont en interaction directe avec les phénomènes climatiques et parfois de façon contradictoire. Afin d'appréhender les impacts du réchauffement climatique sur les cultures, il faut en premier lieu différencier les cycles phénologiques d'une plante, qui sont directement dépendant de la température, de la croissance en termes de biomasse qui est d'abord liée à la photosynthèse, donc au rayonnement et à la concentration de CO₂ atmosphérique (Roche, 2010).

On peut directement appréhender deux processus prévisibles : un avancement dans l'année des cycles phénologiques et un raccourcissement de ces cycles, notamment des phases de floraisons et maturations ou remplissages des grains (Roche, 2010). Si le raccourcissement peut avoir un effet bénéfique sur les besoins en eaux, comme la quantité totale de rayonnement intercepté par la culture est réduite, cela réduit aussi la durée de remplissage des grains et cela impacte donc les rendements (Levrault et al., 2010). D'autres phénomènes sont attendus, un allongement des périodes d'intercultures, une augmentation des jours où l'humidité des sols permet le travail des engins agricoles et une augmentation des problèmes liés à la levée des semis.

Globalement les facteurs limitants habituels de l'agriculture comme les gels précoces et tardifs vont devenir moins prégnants, et ce, au profit des problèmes d'alimentation hydrique et des fortes températures provoquant des échaudages thermiques une augmentation du nombre de jour échaudant qui impactent négativement les rendements (Roche, 2010).

IV - 2.2. Confort hydrique et demande en eau

On s'attend à une augmentation du stress hydrique des cultures et donc du besoin en irrigation des cultures de printemps, dû à la baisse prononcée de la pluviométrie estivale et printanière et à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle, mais ce sont des phénomènes qui vont être partiellement compensés par l'accélération des cycles phénologiques avec un processus d'esquive des périodes les plus critiques (Roche, 2010).

Au niveau de la problématique du confort hydrique des cultures plusieurs points peuvent être éclairés. Plusieurs notions doivent être définies :

-Le Confort hydrique peut être appréhendé comme le rapport de l'évapotranspiration réelle sur l'évapotranspiration maximale (ETP appliquée à la culture) = ETR/ETM

-Le Besoin en irrigation potentielle ou déficit hydrique = $ETM - ETR$

-Indice agro-climatique ou déficit climatique = $P-ETP$

Au niveau des besoins en irrigation potentielle, les résultats du projet CLIMATOR montrent une augmentation des maxima journaliers (+1mm/j), un accroissement des besoins en début de cycle (lié à l'augmentation plus précoce et plus rapide de la surface foliaire), et globalement des besoins supplémentaires de l'ordre d'un ou deux tours d'eau (Levrault et al., 2010).

Il y a une relation de dépendance mais aussi d'incidence entre l'agriculture et la ressource en eau qui peut être globalement appréhendée par la différence entre les précipitations et l'eau qui est consommée

par les systèmes cultureux, que ce soit en système irrigué ou en système pluvial (Itier, 2010). Il s'agit donc d'étudier comment va évoluer l'adéquation entre les prélèvements et les ressources du milieu, et notamment comment va évoluer l'avancée prévue des calendriers d'irrigation en parallèle aux étages les plus précoces.

IV - 2.3. Cultures

Il est nécessaire de distinguer deux grands types de cultures. Contrairement aux plantes de type blé (froment), tournesol et colza le métabolisme du maïs et du sorgho ne permet pas de valoriser autant l'augmentation des concentrations en CO₂, et notamment l'effet antitranspirant que cette augmentation entraîne avec la diminution de la nécessité des ouvertures stomatiques (Brisson, 2010). Ainsi, on peut s'attendre à une augmentation des rendements des cultures d'hiver, des prairies et des cultures pérennes dans la mesure où les stress hydriques seront évités ou compensés (Ibid).

Pour le maïs, deux effets contradictoires : les besoins en eau d'irrigation vont augmenter parallèlement à l'évolution du déficit hydrique climatique (P-ETP) mais seront également partiellement freinée à plus long terme par le raccourcissement des phases phénologiques du cycle de croissance. Les auteurs avancent une augmentation des besoins en irrigation de l'ordre d'un demi du déficit hydrique soit +40 mm en moyenne (Brisson, 2010).

Si l'avancée des dates de semis peut sembler une piste intéressante, Brisson (2010) précise que les modélisations montrent que l'effet d'esquive n'est pas observé ni sur les rendements et demande en irrigation de la culture du maïs ni sur le stress hydrique de la culture de sorgho.

L'explication donnée à ce phénomène est que l'augmentation de température et la baisse de la pluviométrie va de pair avec une augmentation du rayonnement qui entraîne une augmentation de la demande climatique, demande climatique qui n'est pas contrebalancée par l'effet antitranspirant de l'augmentation des teneurs en CO₂ pour les plantes comme le maïs et le sorgho (Brisson, 2010).

En conclusion on peut s'attendre à ce que la monoculture de maïs grain irriguée soit fortement impactée par le changement climatique avec des pertes de rendements, (de l'ordre de 1 à 1.5 t/ha) dû au raccourcissement de la période de remplissage des grains, et à une augmentation du besoin net en irrigation lié au déficit hydrique (Brisson, 2010).

IV - 3. Matériel et méthode

IV - 3.1. Modèle AquaCrop

Le modèle AquaCrop est un modèle de culture développé par la FAO, il simule la production de biomasse en fonction de la quantité d'eau transpirée par les plantes dont le développement est affecté par les stress hydriques et les températures (qui déterminent le temps thermique exprimé en degrés-jour-croissance ; Vanuytrecht et al., 2014). Le modèle converti l'évapotranspiration réelle des cultures en biomasse selon un paramètre de productivité hydrique relatif à chaque culture (WP), et les rendements des récoltes sont calculés à partir d'un indice de récolte appliqué à la biomasse (HI) (Wellens et al., 2022). Les stress hydriques sont pris en compte à travers une série de paramètres qui vont agir sur la couverture de canopée, la fermeture des stomates et la transpiration (Ibid).

L'augmentation des concentrations en CO₂ entraîne une augmentation du paramètre de productivité hydrique (WP) et une diminution de la transpiration, qui est variable selon les cultures (Vanuytrecht et al., 2014).

Comme illustré sur la figure ci-dessous, le modèle AquaCrop résout un bilan hydrique à l'échelle d'une parcelle de 1 m². Le profil de sol est divisé en compartiments de 10 cm d'épaisseur dont le contenu en eau est calculé en mm par jour. Les mouvements d'eaux entre compartiments dépendent des propriétés spécifiques du sol, comme le contenu en eau à saturation et à la capacité au champ ainsi que du

coefficient de perméabilité (Gaelen, 2016). Lorsque que la capacité au champ d'un compartiment est dépassée, de l'eau est drainée hors du compartiment vers le prochain, et le drainage hors du dernier compartiment atteint par la zone racinaire est considéré comme de la percolation profonde vers l'aquifère (Gaelen, 2016).

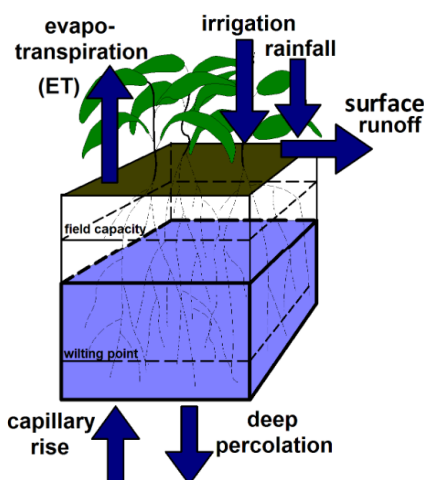


Figure 52 : Bilan hydrique dans AquaCrop (Gaelen, 2016).

Nous avons utilisé le modèle de culture et de gestion de l'irrigation AquaCrop (V6.1.) afin de mettre en œuvre une modélisation de l'évolution des besoins en eau des cultures ainsi que des volumes d'eau qui sortent du profil du sol par percolation, en ne prenant en compte que les facteurs liés directement au climat, en conditions non limitées par la fertilité du sol, les maladies, et les mauvaises herbes. Des fichiers de chroniques climatiques, types de sols, et type de cultures ont été construits, sur base des informations et des données qui ont pu être rassemblées.

IV - 3.2. Projections climatiques

Les résultats des corrections ADAMONT¹³ de différents modèles régionaux sont mis à disposition sur le portail du DRIAS. Les chroniques de deux modèles régionaux climatiques (RCM), CNRM-ALADIN63 de Météo-France et KNMI-RACMO22E de l'Institut royal des Pays-Bas ont été récupérées et pondérées sur la superficie des unités de gestion Autize nappe et Autize superficielle. Les deux modèles régionaux proviennent de descente d'échelle du modèle global de climat (GCM) CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.

Ces projections issues de modèles de climat régionaux sont biaisées (Taranu, et al., 2023 ; Evin, et al., 2021) et la correction ADAMONT utilisée ne permet pas de corriger l'ensemble des biais. Ainsi, il faut souligner que ces projections ont tendance à être trop froide par rapport à l'ensemble CMIP6 analysé par le 6ième rapport du GIEC, et sont plus pluvieuses.

Les données de sorties ont été obtenues pour une simulation sur la période de référence 1950-2005 et pour la période 2006-2100 selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serres du GIEC : RCP4.5 (scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO₂), et RCP8.5 (scénario sans politique climatique).

Les simulations de références sur la période 1950-2005 peuvent être biaisées par rapport à la référence historique obtenue à partir des réanalyses Safran, la comparaison permet de se faire une idée des biais des modèles sur le secteur étudié.

¹³ Méthode d'ajustement statistique.

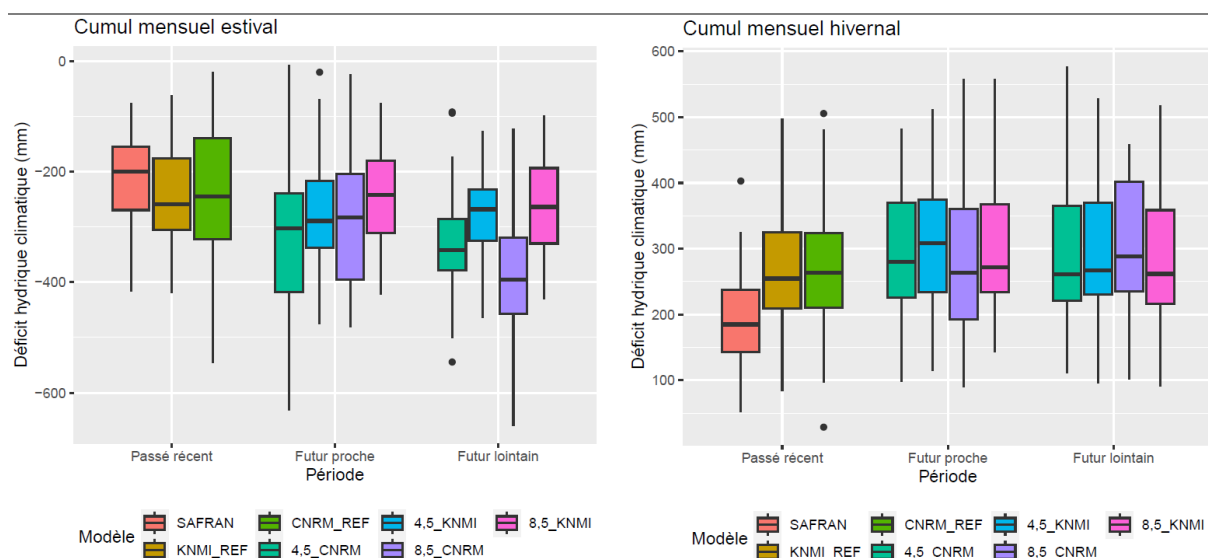


Figure 53 : Evolution et comparaison des cumuls mensuel estival et hivernal du déficit hydrique climatique (P-ETP) sur l'unité de gestion Autize nappe (UGVP 14) pour les réanalyses Safran, et les deux RCM (Données : Safran et DRIAS).

On peut observer sur la figure ci-dessus les résultats des projections climatiques des deux modèles régionaux concernant le bilan hydrique climatique (précipitation – ETP) en cumulé sur la période estivale (mai, juin, juillet, août, septembre), et hivernale (novembre, décembre, janvier, février, mars). Les périodes comparées sont : le passé récent (PR), de 1975 à 2005, le futur proche (FP), de 2025 à 2055 et le futur lointain (FL), de 2065 à 2095.

On remarque que les deux modèles régionaux présentent un biais médian similaire en comparaison aux résultats des réanalyses Safran. Les modèles présentent un déficit médian de l'ordre de 50 mm supérieur (plus sec) pour la période estivale et de 70 mm inférieur (plus pluvieux) pour la période hivernale.

Pour le futur proche et lointain, on observe une augmentation du déficit pour la période estivale assez variable selon les modèles, et une stabilité pour la période hivernale. Au niveau du déficit hydrique climatique en cumulé mensuel, on note des augmentations nettement plus marquées pour le modèle de Météo-France (ALADIN63) qui vont de 50 mm dans un futur proche à 100 ou 150 mm dans un futur lointain.

IV - 3.3. Typologies des sols et réserves utiles

IV - 3.3.1. Profil type de sol

Plusieurs sources de données ont été croisées afin de déterminer les caractéristiques et la réserve utile en eau des différents grands types de sol qu'on retrouve sur le secteur des Autizes. La Carte de la Réserve Utile en eau et la carte de la profondeur du sol issue de la Base de Données Géographique des Sols de France (Le Bas et al., 2018 et 2021) a été exploitée, ainsi que les données la Base de Données Géographique des Sols de France (INRA, 2018), des informations statistiques d'analyses de terres fournies par la Base de Données d'Analyses des Terres – BDAT (Saby et al., 2015) et des propriétés de granulométrie (argile, limons, sables) et teneur en éléments grossiers à différentes profondeurs (Dobarco et al., 2022).

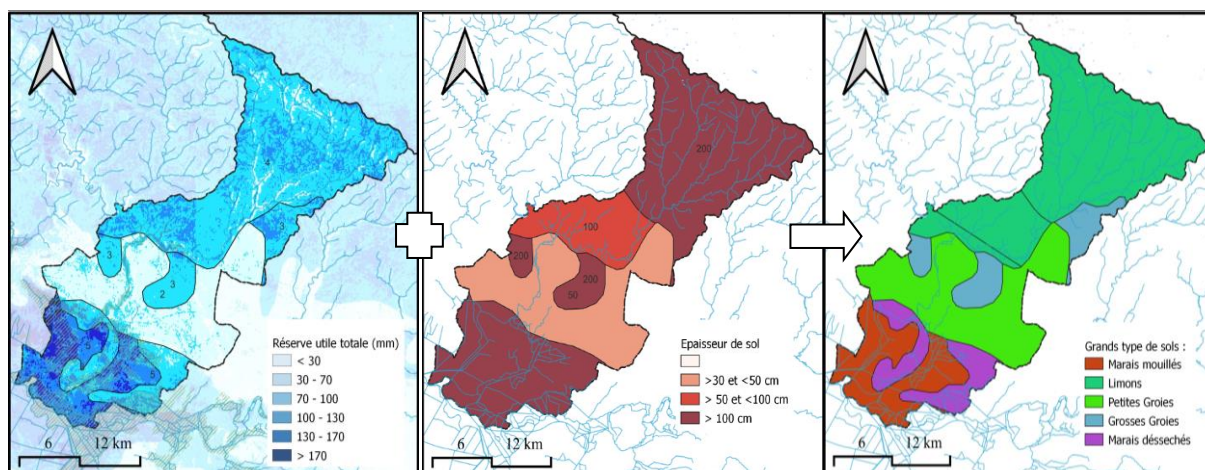


Figure 54: Carte des réserves utiles en eau, de l'épaisseur de sol et des grands types de sols sur le secteur des Autizes (Données : Le Bas et al., 2018 et Le Bas et al. 2021).

Quatre profils type de sols ont été construits pour la modélisation AquaCrop : Marais desséchés, Grosses groies, Petites groies et Limons. Une description détaillée des profils de sols est présentée en annexe (au point 8). Les fichiers Petites Groies et Grosses Groies ont été calibrés également en fonction des coupes de sols qui ont été réalisées à proximité du secteur des Autizes (c.f. Figure 29).

IV - 3.3.2. Battement de nappe

Les profondeurs moyennes mensuelles (2010-2022) du niveau piézométrique au Grand-Nati vis-à-vis de la surface topographique ont été rentrées dans le modèle pour les battements de nappes affleurantes. Les niveaux les plus hauts sont situés à 4.4 m. en février et on n'observe aucune remontée capillaire dans les sorties de modèle. Pour les Marais desséchés, les drains sont généralement enterrés à une profondeur d'un mètre et la hauteur d'eau dans les fossés est indépendante de la hauteur d'eau dans les sols ainsi une cote d'un mètre est gardée pour le toit de la nappe.

IV - 3.4. Typologie des cultures

Les fichiers de cultures ont été construits sur base des informations qui ont pu être rassemblées à propos des variétés, dates et densité de semis, qui sont généralement mis en œuvre sur la plaine du Sud-Vendée. Une source majeure d'informations au sujet des pratiques du secteur sont les bulletins d'informations et de conseils sur l'irrigation et les restrictions de prélèvements Inf'Eau Plaine Sud-Vendée (85) produit par la Chambre d'agriculture Pays de la Loire de 2020 à 2023.

Quatre fichiers type de culture ont été construits : blé tendre d'hiver, tournesol, maïs grain irriguée et maïs ensilage. Le blé d'hiver est semé le 10 novembre, en semis direct, avec 350 plants au m². Le tournesol est semé le 28 mars, en semis direct avec 5.7 plants au m². Le maïs ensilage, est une variété précoce, semée le 10 avril, à 10 plants au m², la phase de floraison arrive au 840-ème degrés-jour et dure 180 degrés-jour, et la phase de maturité vers 1476 degrés-jour. Le maïs grain, est également une variété précoce, (indice 550), semée le 10 avril, à 9.5 plants au m², phase de floraison vers le 888-ème degrés-jour et dure 156 degrés-jour, avec une maturité atteinte après 1740 degrés-jour.

IV - 4. Résultats et discussion

IV - 4.1. Rendement

Nous pouvons comparer les résultats de sorties du modèle pour les chroniques climatiques de références obtenues par les réanalyses Safran, au niveau des rendements avec les informations que nous avons pu rassembler concernant les rendements moyens des cultures sur le secteur de la plaine.

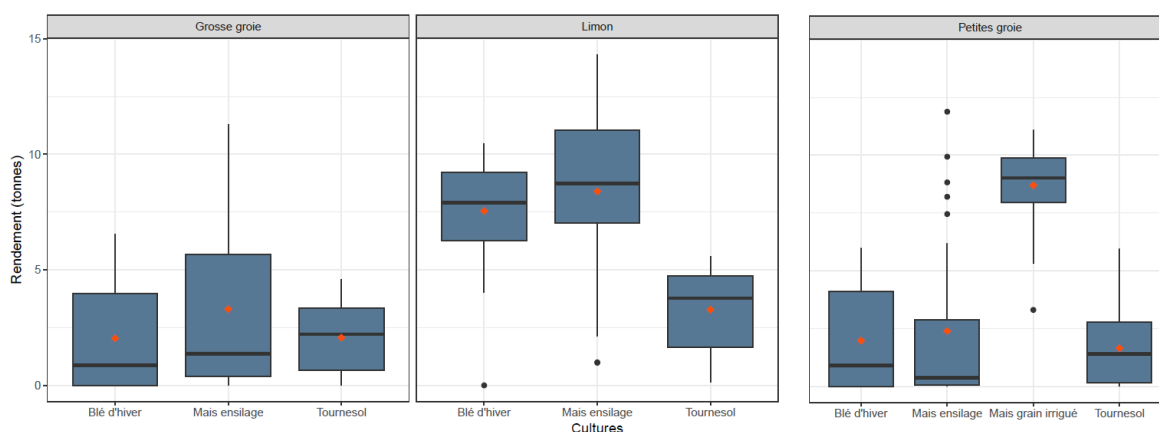


Figure 55: Rendement médian (box-plot) et moyen (point rouge) des principales cultures sur la période 1975–2005 (chroniques climatiques Safran) pour l'Unité de Gestion Autize Nappe modélisé par AquaCrop.

On remarque sur la figure ci-dessus la grande variabilité des résultats de sorties AquaCrop concernant les rendements des cultures principales.

Données	Enquête de terrain (Pichot, 2019)			AquaCrop		
	Petites Groies	Grosses Groies	Limons	Petites Groies	Grosses Groies	Limons
Rdt moyen maïs sec (tonnes)	2,5 à 4	4 à 6	7 à 9	2,5	3,3	8,3
Rdt moyen maïs irrigué (tonnes)	11,5 à 13,5	11,5 à 13,5	11,5 à 13,5	8,7	/	/
Rdt moyen blé tendre (tonnes)	5,5 à 6,5	8	8,5 à 9	2,3	2,3	7,5
Rdt moyen tournesol (tonnes)	2 à 2,5	2,5 à 3	2,5 à 3	2,2	2,4	3,2

Tableau 10 : Comparaison rendement moyen sur la plaine de Fontenay à Niort pour les principales cultures, enquête de terrain vs AquaCrop. (Données : Pichot, 2019).

Comme indiqué sur le tableau ci-dessus, on remarque que les sorties AquaCrop ont tendance à sous-estimer les rendements si l'on se fie aux données qualitatives des enquêtes de terrain de Pichot (2019). C'est le cas particulièrement pour les rendements de blé tendre hivernal sur petites et grosses groies, et pour les rendements de maïs en sec sur grosses groies. Le maïs grain irrigué n'a bénéficié dans les modélisations AquaCrop que de 150 mm répartis en 6 tours d'eaux, correspondant à une condition où le volume est particulièrement limitant, ce qui peut expliquer les résultats de rendements légèrement inférieurs.

IV - 4.2. Humidité du sol

Sur la figure ci-dessous nous pouvons comparer la sortie du modèle AQUACROP avec les données d'une sonde d'humidité du réseau AQUALIS pour une parcelle de maïs semée le 10 avril sur un sol de groie moyen (la sonde est située à plus de 60 km à l'Ouest du secteur de l'Autize), au niveau de

l'évolution de l'humidité totale cumulée sur l'ensemble du profil de sol entre le 12 avril et le 1 juin 2023. On observe une net différence en valeur absolue, mais une dynamique sensiblement proche.

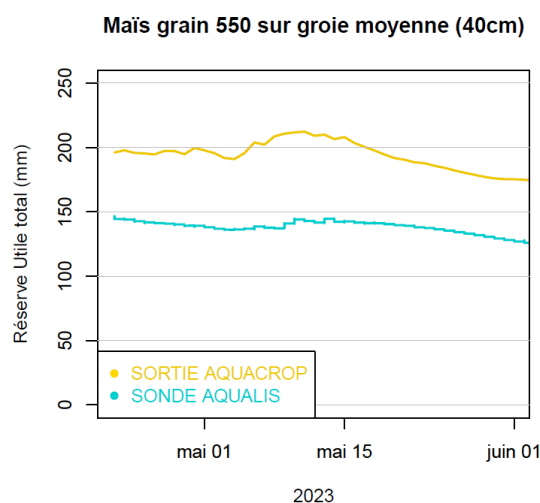


Figure 56: Comparaison entre les résultats AQUACROP et une sonde d'humidités du réseau AQUALIS de l'évolution de la teneur en eau cumulée sur l'ensemble du profil d'un sol de groie moyenne entre le 12 avril et le 1 juin 2023 (Données : Réseau de sonde AQUALIS)

IV - 4.3. Besoin net en eau

Si le phénomène d'anticipation et du raccourcissement des cycles est effectivement modélisé et pris en compte par le modèle, les dates de semis ont été maintenu fixe sur l'ensemble de la période simulée (1975-2100). Les simulations ont été réalisées pour chaque culture selon chaque type de sol pour l'entièreté de chaque chronique climatique, ainsi l'humidité des sols est modélisée en continu sans être réinitialisée à un certain taux entre chaque année.

On peut observer sur la figure ci-dessous l'évolution des besoins nets annuels en eau modélisés entre le passé récent, le futur proche et le futur lointain pour les cultures principales selon les différents types de sols, pour le scénario d'émission RCP 4.5. Le besoin net est estimé à partir de la quantité d'eau nécessaire pour maintenir l'humidité du profil de sol à 90% de la réserve utile facilement utilisable par la plante (RAW). Ainsi, les valeurs absolues obtenues ne sont pas comparables à des volumes qui seraient réellement mis en œuvre pour de l'irrigation.

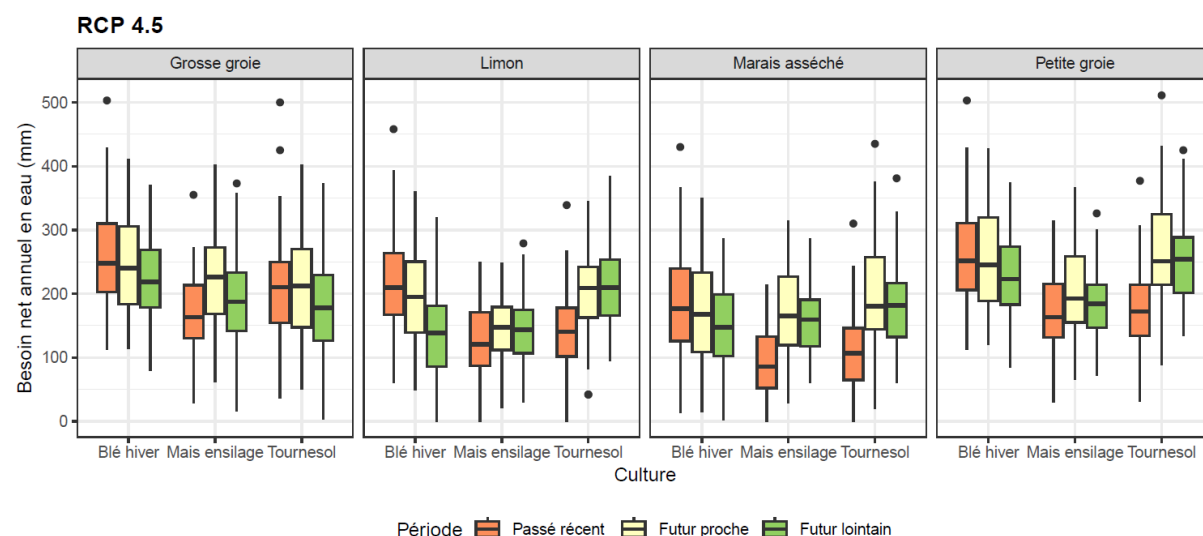


Figure 57 : Evolutions des besoins nets annuels en eau modélisées entre le passé récent, le futur proche et le futur lointain pour les cultures principales selon les différents types de sols, pour le scénario d'émission RCP 4.5.

Pour les cultures de maïs ensilage précoce et de tournesol nous pouvons remarquer globalement une augmentation pour le futur proche et lointain qui est systématiquement plus marquée pour le futur proche que pour le futur lointain. C'est le tournesol qui est concerné par les augmentations les plus importantes, avec des valeurs de +70 à +80 mm selon les sols. Le maïs présente des augmentations médianes qui varient de +20 à +80mm selon les sols et les périodes. Pour un sol de groies superficielles les besoins augmenteraient de +28 et +20 mm dans un futur proche et lointain et de +64 et +26 mm pour un sol de groie moyens.

On note également une diminution récurrente des besoins pour la culture de blé tendre d'hiver, pour tous les types de sols, et qui est plus poussée pour le futur lointain que le futur proche.

La différence entre le besoin net annuel du passé récent et celui du futur proche et lointain est synthétisée dans le tableau ci-dessous. Les données sont présentées en relatif et nous abordons uniquement l'évolution des besoins. On note une diminution pour le blé tendre d'hiver et des augmentations pour les deux cultures de printemps qui sont plus marquées pour le scénario d'émission RCP 4.5 et que 8.5.

Sol	Scénario	RCP 4.5		RCP 8.5	
		Futur	Proche	Proche	Lointain
Petites groies	Maïs ensilage		+17 %	+12 %	+11 %
	Tournesol		+46 %	+47 %	+1 %
	Blé tendre d'hiver		-2 %	-11 %	-13 %
Grosses groies	Maïs ensilage		+39 %	+16 %	+7 %
	Tournesol		+1 %	-15 %	-9 %
	Blé tendre d'hiver		-3 %	-12 %	-13 %
Limens	Maïs ensilage		+22 %	+19 %	+2 %
	Tournesol		+49 %	+50 %	+32 %
	Blé tendre d'hiver		-7 %	-34 %	-14 %
Marais asséchés	Maïs ensilage		+93 %	+86 %	+3 %
	Tournesol		+68 %	+70 %	-6 %
	Blé tendre d'hiver		-5 %	-16 %	-18 %
Moyenne	Maïs ensilage		+50 %	+36 %	+9 %
	Tournesol		+56 %	+49 %	+5 %
	Blé tendre d'hiver		-9 %	-40 %	-32 %

Tableau 11: Evolutions des besoins nets annuels en eau médians par rapport au passé récent sur les principales cultures pour quatre types de sols, selon les scénarios d'émissions RCP 4.5 et 8.5.

Nous pouvons comparer nos résultats à ceux obtenus par les auteurs du projet CLIMATOR. Pour une station proche de Lusignan (50 km à l'Est du secteur des Autizes), les auteurs anticipent une augmentation de l'ordre +47mm dans un futur proche et +131mm dans un futur lointain pour une variété tardive de maïs, en limitant l'irrigation à 80% de l'ETM (Roche, 2010).

Nos résultats ne montrent pas une telle augmentation pour le maïs, notamment car c'est une variété précoce au cycle court que nous avons modélisée. Cependant l'orientation générale est concordante. On retrouve une augmentation du besoin net en irrigation pour les cultures de printemps, en lien avec l'augmentation du déficit climatique (P-ETP) sur la période estivale et la diminution du rapport ETR/ETM (Itier, 2010). L'augmentation est plus poussée pour le futur proche que pour le futur lointain, et ce en lien avec le raccourcissement des phases phénologiques (Itier, 2010).

Ainsi, on peut s'attendre à des doses d'irrigation qui vont augmenter pour les cultures de printemps tout en étant tempérées par la diminution de l'ETM, due au raccourcissement des phases phénologiques. Le déficit de pluviométrie couplé à une augmentation de la demande pour l'irrigation des cultures peut amener à des déficits globaux potentiellement important sur la période estivale. Néanmoins, une forte variabilité interannuelle masque ces évolutions à long terme.

IV - 4.4. Ressource en eau

IV - 4.4.1. AquaCrop

Nous pouvons également nous intéresser à l'évolution de la recharge, et des possibilités d'AquaCrop pour estimer l'influence des cultures et profils de sols sur celle-ci. L'évolution de la relation entre précipitation et recharge annuelle entre le passé récent, le futur proche et le futur lointain, est représentée sur la figure ci-dessous, selon trois types de cultures, pour le scénario d'émission RCP8.5.

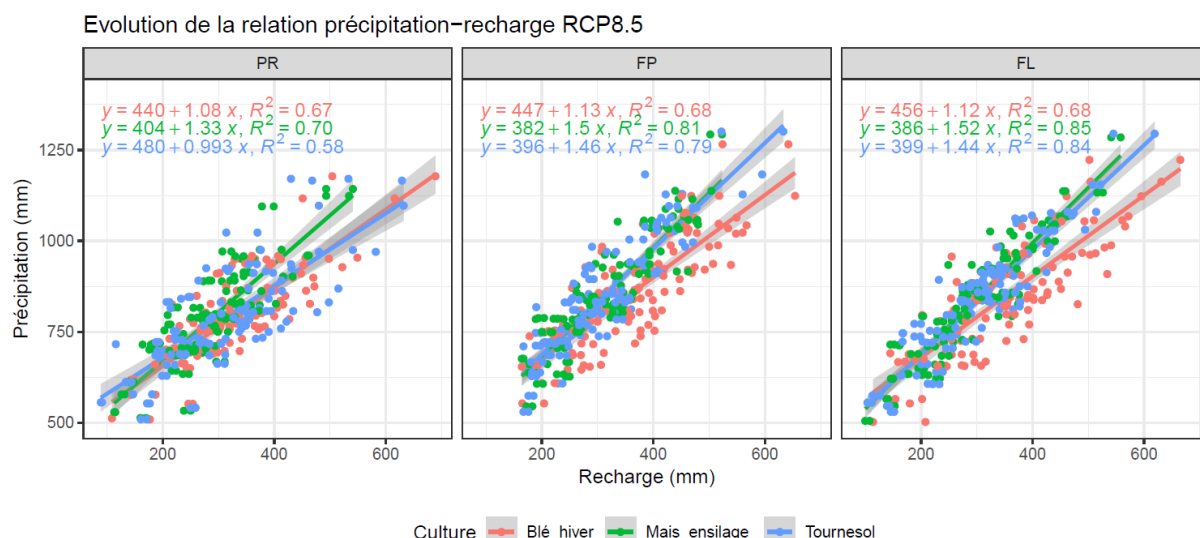


Figure 58: Evolution de la relation précipitation-recharge sur l'ensemble des profils de sols entre le passé proche (PR), le futur proche (FP) et le futur lointain (FL), selon trois types de cultures pour le scénario d'émission RCP8.5.

Nous pouvons noter une diminution de la recharge pour un même cumul de précipitation, qui se traduit par un redressement des droites de régressions pour les cultures de printemps entre la période récente et les périodes futures. Le redressement est plus marqué pour le futur proche. Cela semble indiquer une légère évolution dans la réponse de la recharge aux précipitations en volume annuel, en lien avec l'évolution des besoins en eau des cultures. Ainsi, il faudrait au futur, plus de précipitation pour une même recharge, et l'on obtiendrait moins de recharge pour la même quantité de précipitation. A titre d'illustration, si pour des précipitations annuelles de 800 mm on observait une recharge de l'ordre de 320 mm dans le passé proche, la recharge ne serait que de 220 mm dans un futur proche ou lointain pour une culture de tournesol selon les équations des régressions ci-dessus.

On remarque un avantage des cultures d'hivers, sur celles de printemps en termes de restitution au milieu, et ce quelles que soient les périodes étudiées.

IV - 4.4.2. Thornthwaite

La pluie efficace et la recharge ont été estimées¹⁴ à partir des chroniques climatiques avec la méthode de Thornthwaite selon les réserves en eau utilisable (RU) des 4 types de sols majeurs du secteur des Autizes. On obtient des recharges annuelles médianes sur la période 1960-2010, de 180 pour les petites groies et 80 mm pour sols de marais desséchés à partir des chroniques climatiques des réanalyses Safran.

Sur la figure ci-dessous, nous pouvons comparer les résultats obtenus par la méthode de Thornthwaite pour estimer la recharge annuelle avec les résultats des modélisations AquaCrop concernant les volumes qui sortent du profil de sol par percolation annuelle. On remarque que la recharge estimée avec Thornthwaite est systématiquement inférieure au volume percolé d'AquaCrop. Cela peut s'expliquer notamment par le fait que la méthode de Thornthwaite ne prend pas en compte l'évolution

¹⁴ Le modèle ESPERE4.4. du BRGM a été utilisé pour réaliser les calculs.

du coefficient cultural selon le stade végétatif qui influence la valeur de l'ETR. On peut observer également qu'il y a globalement peu de variations entre les profils de sols pour le modèle AquaCrop alors que la recharge va en décroissant selon la valeur de la réserve utile des sols pour la méthode de Thornthwaite. Cela peut s'expliquer entre autres car avec Thornthwaite l'entièreté du volume de la réserve utile va contribuer à l'évaporation alors qu'AquaCrop différencie la fraction de la réserve utile qui est réellement mobilisable pour l'évaporation et l'évapotranspiration des plantes.

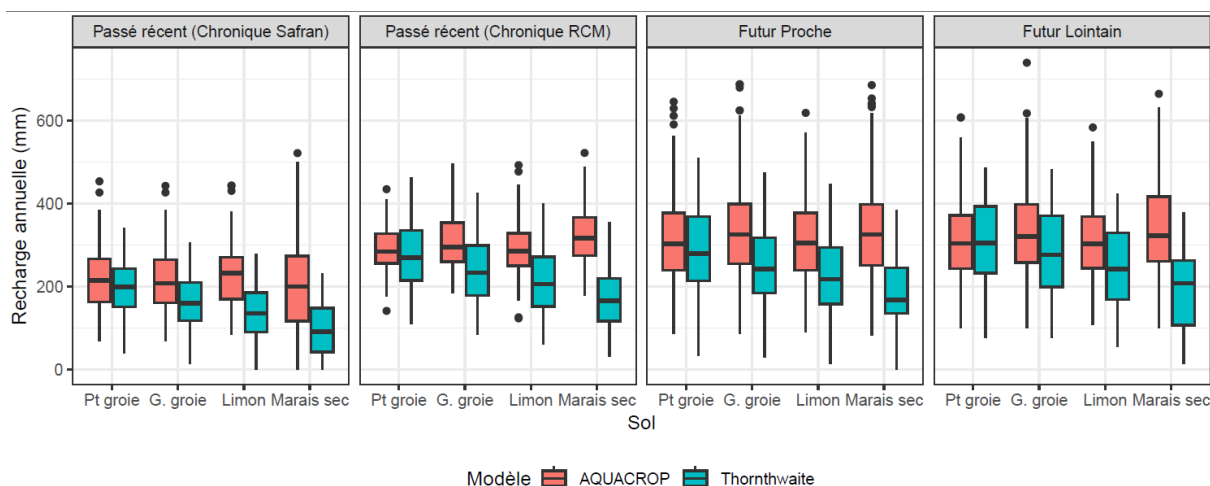


Figure 59 : Comparaison de la recharge estimée par la méthode de Thornthwaite et par la modélisation AquaCrop selon les types de sols et les périodes passé récent, futur proche et lointain.

Pour la période de passé récent, on observe que les chroniques climatiques des modèle régionaux de climat (RCM) entraînent une recharge qui est plus de 50 mm supérieurs aux volumes estimés avec les chroniques climatiques des réanalyse Safran. Cela confirme que les chroniques des RCM ont tendances à être trop pluvieuses pour la période hivernale vis-à-vis des données observées (cf. point IV - 3.2.).

Entre le passé récent et le futur proche et lointain, on remarque globalement assez peu de différence au niveau des valeurs médianes de recharge annuelle. Cependant on observe une augmentation de la variabilité avec une élongation des quartiles supérieurs et inférieurs, qui est plus prononcée pour le futur proche que lointain.

IV - 5. Limites

Nous pouvons nous interroger sur les limites de notre approche et mise en œuvre d'AquaCrop pour estimer précisément les impacts du changement climatique sur le besoin en eau des cultures. L'approche consistant à calculer les volumes d'eau nécessaires pour maintenir au sein des différents profils de sols des teneurs en eau supérieur à 10% de la réserve en eau facilement utilisable par les plantes est questionnable. D'autres approches permettant d'estimer les besoins en eau des cultures en plafonnant l'évapotranspiration réelle selon un taux de satisfaction de l'évapotranspiration maximale sont engageantes.

Les besoins nets estimés ne peuvent être convertis en tours d'eau d'irrigation de manière directe pour plusieurs raisons. Premièrement, ils ne prennent pas en compte les périodes les plus critiques, les plus sensibles au stress hydrique comme la phase de floraison/fécondation et de remplissage des grains pour les cultures de maïs et tournesol. Ensuite, il faudrait appliquer des facteurs d'efficacité d'irrigation pour convertir les sorties de modèles en termes de besoin net pour la recharge de la réserve du sol en volume brut d'apport d'irrigation. Ces facteurs d'efficacités sont variables et dépendent notamment de la technique mis en œuvre (pivot, enrouleurs, goutte à goutte).

Des informations spatialisées sur les cultures irriguées du secteur ainsi que les volumes précisément mis en œuvre seraient nécessaires afin de proposer une estimation précise de l'évolution possibles des volumes dans un contexte de changement climatique. Des bases de données plus larges concernant les rendements des différentes cultures sur les différents sols du secteur sont également nécessaires afin de mieux adapter les paramètres du modèle pour le contexte spécifique.

Néanmoins les variations de volumes entre passé récent et futur proche et lointain peuvent être des pistes d'informations en valeur relative pour estimer les ordres de grandeurs en jeu en valeur absolue, en se basant sur les tours d'eau réellement mis en œuvre selon les cultures, les types de sols et la ressource disponible sur le secteur. Les volumes réellement utilisés restent dépendants des ressources disponibles et des conditions d'exploitations, qui peuvent être limitantes ou non, mais aussi du rendement final souhaité.

Conclusion

L'objectif de ce travail était de rassembler et d'analyser les informations et les données nécessaires pour appréhender avec précision le contexte et la problématique à laquelle est venue répondre la mise en place des réserves de substitutions sur le secteur spécifique du bassin versant des Autizes. Il s'agissait également d'étudier les cotes de gestions des prélèvements estivaux et d'autorisation des remplissages hivernaux. Mais aussi d'estimer ce qu'il était possible d'observer concernant les impacts des projets de substitutions sur l'hydrosystème par une approche classique basée sur des mesures observées. Enfin, il était question d'estimer l'adéquation entre la ressource et les besoins en eaux sur le territoire dans un contexte de changement climatique.

Nous avons pu identifier certaines valeurs seuils qui gouvernent les relations entre eaux souterraines et eaux de surfaces sur la zone de bordure du Marais poitevin dans les secteurs des Autizes, et apprécier l'influence des prélèvements sur l'hydrosystème dans ce secteur critique. On a également pu comparer ces côtes avec les côtes de gestion des prélèvements estivaux, et l'on a observé que la côte de crise (d'arrêt des prélèvements) de 2.5 m NGF ne garantit pas nécessairement l'absence totale d'inversion du gradient hydraulique entre les niveaux dans le Marais mouillé et la nappe de bordure.

Au niveau des cotes de gestion qui ont été misent en place pour les prélèvements hivernaux des réserves de substitutions, on peut déduire de nos observations que les seuils de remplissage ne garantissent pas nécessairement, un écoulement visible de l'Autize vers St Pierre, à son entrée dans le Marais. En effet, il semble que 0,5 m³/s enregistrés à la station de St-Hilaire et une cote de 4.5 m NGF au Grand-Nati sont nécessaires pour observer un écoulement visible au niveau de St-Pierre.

Au niveau des prélèvements hivernaux pour les ouvrages de substitution nous avons observé une orientation vers la concentration des prélèvements dans le temps sur les 10 dernières années : de prélèvements relativement uniformes sur la période de remplissage on est passé à des saisons de remplissages marquées par des arrêts répétés. Nous avons également mis en lumière que la recharge effective de la nappe semble s'être décalée de l'ordre d'un mois depuis la mise en place des réserves de substitution (du moins au droit du piézomètre du Grand-Nati). Nous avons remarqué que les rabattements localisés provoqués par le remplissage de certaine réserve pouvaient entraîner de légères inversions du gradient entre la nappe de bordure et le Marais mouillé qui engendraient parfois l'arrêt des prélèvements. Enfin, nous avons pu observer une tendance (peu significative) à la diminution du nombre de jour où la cote piézométrique autorisant les remplissages est atteinte sur la période de remplissage, le mois de novembre étant le plus concerné.

Concernant la modélisation de l'évolution des besoins net en eaux des cultures du secteur dans un contexte de changement climatique, en comparaison aux besoins estimés sur la période de passé récent nos résultats montrent une augmentation des besoins des cultures de printemps (maïs et tournesol) et une diminution des besoins du blé d'hiver, qui varie selon le type de sol, la période et le scénario d'émission de CO₂. Afin de quantifier précisément l'évolution de l'adéquation entre les besoins (irrigation) à de l'offre (recharge) dans un contexte de changement climatique, des données précises relatives aux parcelles irriguées ainsi qu'aux doses d'irrigation réellement mise en œuvre sur le territoire sont nécessaires.

Recommandations

Selon différents auteurs qui ont travaillé sur la région (Compère et Thinon-Larminach, 2021 ; Bichot, 2013), si les piézomètres de bordure du Marais, en lien assez direct avec les eaux de surfaces, sont intéressants et utiles pour caractériser les assecs et les inversions de flux, ils ne sont pas représentatifs de l'état de la recharge des nappes ni pertinent pour suivre les effets du changement climatique.

Afin de mieux appréhender les effets des programmes de substitutions sur les débits des cours d'eaux avec des données observées, et de pouvoir fermer des bilans hydriques sur les bassins versants, il serait utile d'équiper le secteur avec des stations de mesure de débit situées plus en aval de la plaine à proximité de la confluence de l'Autize et de la Vendée avec la Sèvre Niortaise.

Enfin, il peut être utile, dans un contexte de changement climatique et de sécheresses hivernales accrues, de pouvoir anticiper - quels que soient les types de prélèvements - la variabilité interannuelle et saisonnière de la ressource pour définir annuellement les volumes prélevables.

Perspectives

Sur le secteur des Autizes on observe que la gestion collective des prélèvements a permis de faire respecter des seuils de crises qui garantissent sinon l'absence absolue, une forte limitation de la problématique des flux d'eaux depuis le Marais vers la nappe et de l'assèchement du Marais mouillé. On observe que les réserves de substitution ont joué un rôle tout à fait central au niveau de la gestion quantitative de la ressource en eau et pour atteindre les volumes qui ont été estimés prélevables (en période estivale) par rapport à d'autres moyens d'actions. La substitution a globalement permis de maintenir les mêmes volumes de prélèvements sur l'année.

On peut néanmoins se questionner sur l'évolution à moyen-long terme de la situation, lorsque que l'on peut d'ores et déjà anticiper une augmentation conjuguée du déficit hydrique en période estivale, de l'évapotranspiration potentielle et des besoins en eaux des cultures de printemps en parallèle à une diminution des possibilités de remplissage des ouvrages de substitutions.

Pour reprendre les conclusions des auteurs du groupe 2 du GIEC dans le chapitre Europe, on observe globalement une tendance à l'augmentation de l'offre (stockage, désalinisation...) au niveau de la mise en œuvre de mesures d'adaptations à la problématique de la ressource en eau, qui ne sera probablement pas suffisante au-dessus d'un certain niveau de réchauffement climatique et qui se fait généralement au détriment d'une action concertée sur la demande (Bednar-Friedl et al., 2022)

Finalement, la problématique de l'évolution de la qualité des eaux stockées dans ce type d'ouvrages et de la quantification des pertes par évaporation reste entière et constitue des perspectives de recherches essentielles afin de doter les décideurs et la société civile de données factuelles pour appréhender de manière éclairée les différentes pistes d'adaptations aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau.

Références

- ANONGBA, B. (2007). *Identification du système hydrogéologique des formations quaternaires et callovo-oxfordiennes du Marais Poitevin par approche couplée minéralogique, hydrodynamique et géochimique.*
- ANSES. (2012). *Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective.*
- Arrêté interdépartemental valant règlement d'eau des ouvrages structurants du marais mouillé de la Sèvre Niortaise, du Mignon et des Autizes. (2017).
- ARVALIS - Institut du végétal. (2006). *Plaine de Vendée, terres de groies. Pilotez l'irrigation avec la méthode IRRINOV. Guide de l'utilisateur, carnet de terrain.*
- Bednar-Friedl, B., R. Biesbroek, D.N. Schmidt, P. Alexander, K.Y. Børshiem, J. Carnicer, E. Georgopoulou, M. Haasnoot, G. Le Cozannet, P. Lionello, O. Lipka, C. Möllmann, V. Muccione, T. Mustonen, D. Piepenburg, and L. Whitmarsh, (2022). *Europe. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1817–1927, doi:10.1017/9781009325844.015
- Bernard Coirier. (1956). *Hydrogéologie de la plaine jurassique de Niort à Fontenay le Comte.*
- Bernard Fournier. (1971a). *Etude des sols de la basse vallée de la Vendée. Tome I.*
- Bernard Fournier. (1971b). *Etude des sols de la basse vallée de la Vendée. Tome II.*
- Bernard Itier. (2010). Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes. In *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces.*
- BERNARD, M. (2006). *Etude des Comportements des Sols de Marais : Evolution Minéralogique, Structurale et Hydromécanique. (Marais de Rochefort et Marais Poitevin).*
- Bichot F. (2007). *BRGM/RP-55349-FR. Analyse des chroniques piézométriques autour du Marais Poitevin en Vendée en vue de l'établissement de POE et PCR.*
- Bichot F., Lavie J., Dequidt D., Thion-Larminach M. (2010). *BRGM/RP56481-FR. Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements en nappe Phase 3 : Actualisation des modèles précédents – Traitement des bassins versants de la Vienne, du Thouet/Sèvre nantaise, du Sud des Charentes et des nappes profondes.*
- Bichot F., Pinault Jean-Louis. (2007). *BRGM/RP-55348-FR. Méthodologie utilisée avec le logiciel TEMPO pour la recherche d'indicateur en nappe et la disponibilité de la ressource en eau en Poitou Charentes.*
- Bichot, O. Douez en collaboration avec Jean-Eudes Dupeuty (EPM) – Etablissement Public du Marais Poitevin. (2015). *RP-64323-FR.F. Etude d'impact pour l'obtention de l'autorisation unique de prélèvement.*
- Bouton, P., & Branger, P. (2007). *Coulonges-sur-l'Autize (1ère éd) [Carte]. BRGM.*
- Bresson, G. (1977). *Etude hydrogéologique des nappes jurassiques du sud de la Vendée (Zone Est) (1ère Phase).*
- Brisson, N., & Levraut, F. (2010). *Livre vert du projet CLIMATOR : 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces.* ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- CACG. (2002). *Etude d'évaluation du volume prélevable dans le Marais-poitevin et ses bassins d'alimentation.*
- CACG. (2005a). *Demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau : Réservoirs de substitution de prélèvements sur les ressources naturelles.*
- CACG. (2005b). *Demande de déclaration d'intérêt général : Réservoirs de substitutions de prélèvement sur les ressources naturelles.*
- CACG. (2005c). *Etude d'impact : Réservoirs de substitution de prélèvements sur les ressources naturelles.*
- N. Carluet, M. Babut, J. Belliard, I. Bernez, B. Leblanc, D. Burger-Leenhardt, J.M. Dorioz, O. Douez, S. Dufour, C. Grimaldi, F. Habets, Y. Le Bissonnais, J. Molénat, A.J. Rollet, V. Rosset, S. Sauvage, P. Usseglio-Polatera. (2016). *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique. Expertise scientifique collective.*
- Carrausse, R. (2020). *Les Sociétés d'Aménagement Régional face à la rénovation du contrat aménageur : Expérimentations et verrouillages quant à la recomposition du rôle de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne.*
- Carrausse, R. (2022). Face à la pénurie d'eau dans le Marais poitevin : Dispositifs de gestion et trajectoire conflictuelle de réserves de substitution pour l'irrigation agricole. *Natures Sciences Sociétés*, 30(3-4), 254-264. <https://doi.org/10.1051/nss/2023005>
- Cécile Bellot (AFB). (2017). *Comment étudier le cumul des impacts des retenues d'eau sur les milieux aquatiques ?*
- COMPÈRE F., ABASQ L., WUILLEUMIER A. (2020). *RP-69563-FR. Appui à la recherche de volumes prélevables temporaires sur les bassins Autizes, Lay, Curé et Vendée du Marais Poitevin.*
- COMPÈRE F., THION-LARMINACH M. (2021). *Reconstitution et caractérisation des régimes hydrologiques naturels sur les unités hydro(géo)logiques cohérentes négociées du SAGE SNMP, et calcul de l'impact du changement climatique sur quatre d'entre elles.*

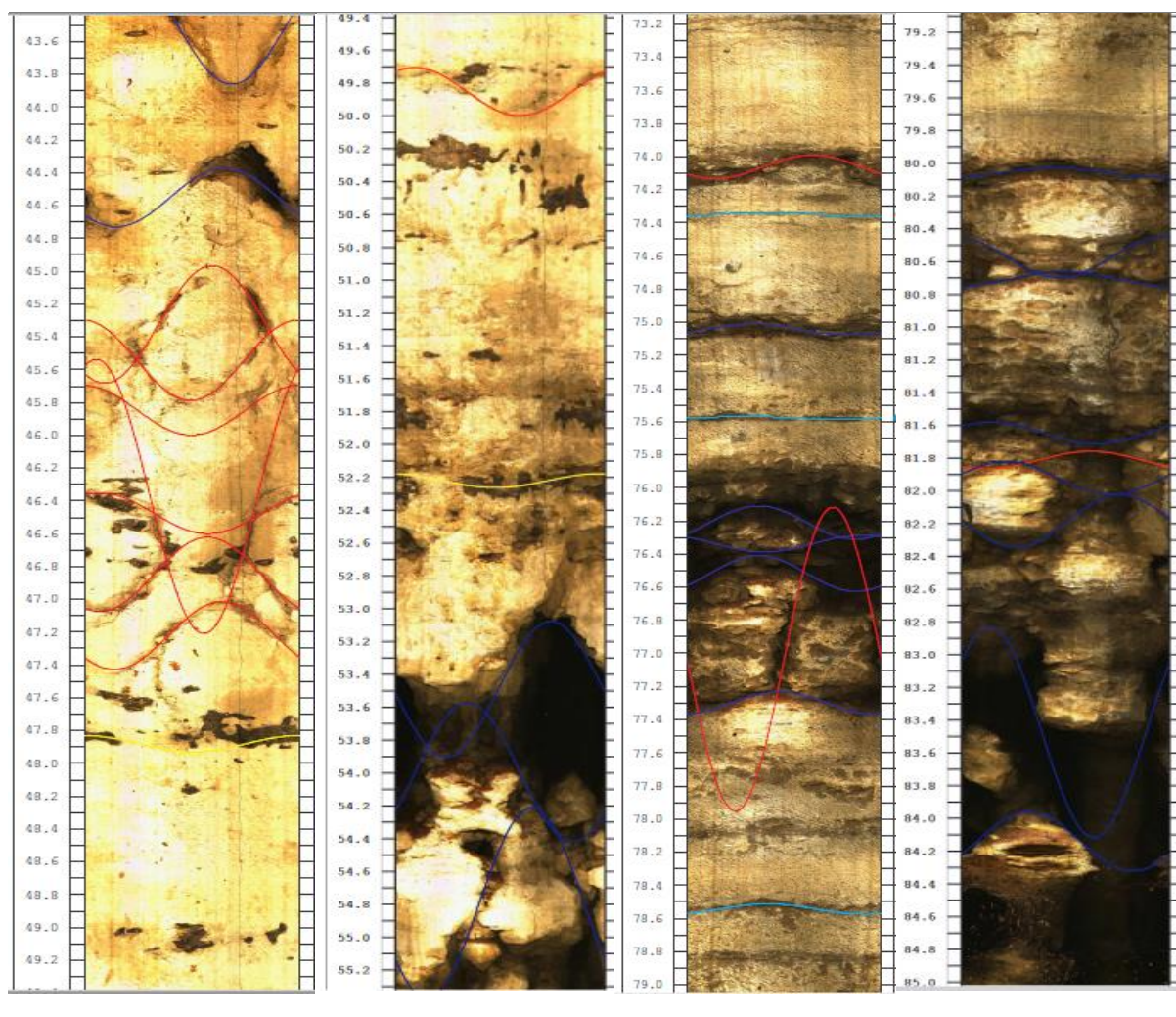
- CONSULT'EAU. (2018). *Problèmes de proliférations biologiques dans les retenues de substitution*.
- Coop de l'eau 79, C. (2017). *Réserves collectives de substitution de prélèvements en eaux sur le bassin de la Sèvre-Niortaise dans le cadre du contrat territorial de gestion quantitative du bassin de la Sèvre-Niortaise de sa source à la confluence du Mignon. Mémoire du pétitionnaire en réponse aux interventions présentées par la commission d'enquête publique*.
- Cours des comptes. Chambres régionales et territoriales des comptes. (2023). *La gestion quantitative de l'eau en période de changement climatique. Cahier territorial n° 10 Pays de la Loire Sous-bassin de la Sèvre nantaise et sous-bassin du Lay*.
- Damien Coulais. (2015). *Atlas du Marais-Poitevin*.
- De Roos, S., De Lannoy, G. J. M., & Raes, D. (2021). *Performance analysis of regional AquaCrop (v6.1) biomass and surface soil moisture simulations using satellite and in situ observations* [Preprint]. Biogeosciences. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-98>
- Denis BAIZE, Nicolas SABY et William DESLAIS (Contrats n° 0375C0035 et 0575C0055). (2007). *Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France, résultats d'une collecte de données à l'échelon national*.
- Dominique Thiéry, Florence Habets, Josette Garnier Jean-Philippe Vidal, Florentina Moatar. (2016). Trajectoires hydroclimatiques du bassin et impacts possibles. In *La Loire fluviale et estuarienne—Un milieu en évolution, Edition : Édition Quae, Chapter : Partie VI, Chapitre 17*, (p. pp.229-242). F. Moatar & N. Dupont.
- Douez, O. (2011). *BRGM/RP-60122-FR. Simulation de l'impact des projets de réserves de substitution du secteur du Lay avec le modèle hydrodynamique du Jurassique*.
- Douez, O. (2012). *RP-60956-FR. Simulation de l'impact des projets de retenues de substitution du secteur Vendée avec le modèle hydrodynamique du Jurassique*.
- Douez, O. (2015a). *BRGM/RP-64816-FR. Actualisation 2008-2011 du modèle maillé des aquifères du Jurassique*.
- Douez, O. (2015b). *Étude réalisée dans le cadre de l'opération d'appui aux politiques publiques*.
- Douez, O., & Bichot, F. (s. d.). *Apport de la modélisation pour la gestion des prélèvements à la périphérie d'une zone humide côtière : Application au Marais-Poitevin*.
- Douez O., Bichot F. (2012). *BRGM/RP-61055-FR. Evaluation de l'impact du changement climatique—Projet EXPLORE 2070—À l'aide du Modèle Jurassique du Poitou*.
- Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit L. (2010). *BRGM/RP-58297-FR. Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique*.
- Douez, O., Du Peuty, J. E., Lepercq, D., & Montginoul, M. (2020). Developing Substitution Resources as Compensation for Reduced Groundwater Entitlements : The Case of the Poitou Marshes (France). In J.-D. Rinaudo, C. Holley, S. Barnett, & M. Montginoul (Éds.), *Sustainable Groundwater Management* (Vol. 24, p. 333-353). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_18
- Ducloux, J., & Nijs, R. (1972). *Contribution à l'étude géologique et géomorphologique du Marais poitevin*.
- E. CARIOU, B. COIRIER, J. DUPUIS et J. GABILLY. (1983). *Notice explicative de la feuille de Niort A 1/50 000*.
- EPMP. (2013). *Plaquette de présentation de l'EPMP*.
- EPMP. (2016). *Protocole 2016 de gestion des Autizes*.
- EPMP. (2022). *Protocole de gestion de l'eau dans les marais de la Vielle Autize*.
- Evin, G., Somot, S., & Hingray, B. (2021). *Balanced estimate and uncertainty assessment of European climatechange using the large EURO-CORDEX regional climate modelensemble* [Preprint]. Earth system change: climate prediction. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-8>
- Frédéric Levraut, Bernard Itier, Nadine Brisson. (2010). Évolution des besoins en irrigation des cultures. In *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces*.
- Gaelen, H. V. (2016). *Evaluating agricultural management from field to catchment scale. Development of a parsimonious agro-hydrological model*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27145.85608>
- Gilbert SIMON. (1998). *Le Marais Poitevin*.
- Godet, L., & Thomas, A. (s. d.). *Changements d'occupation du sol en Marais poitevin au cours des trois derniers siècles*.
- Godet, L., & Thomas, A. (2013). Three centuries of land cover changes in the largest French Atlantic wetland provide new insights for wetland conservation. *Applied Geography*, 42, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.05.011>
- Groupe expert. (2007). *Rapport du groupe d'experts mis en place à la demande du ministère chargé de l'écologie sur les niveaux d'eau dans le Marais poitevin, la piézométrie des nappes de bordure et les volumes prélevables pour l'irrigation dans le périmètre des SAGE du Lay, de la Vendée et de la Sèvre-Niortaise et du Marais poitevin*.
- Habets, F., Amraoui, N., Caballero, Y., Thiéry, D., Vergnes, J.-P., & Morel, T. (s. d.). *Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI- FR*.
- Habets, F., Molénat, J., Carluet, N., Douez, O., & Leenhardt, D. (2018). The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology : A review. *Science of The Total Environment*, 643, 850-867. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.188>
- Habets, F., Philippe, E., Martin, E., David, C. H., & Leseur, F. (2014). Small farm dams : Impact on river flows and sustainability in a context of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4207-4222. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4207-2014>

- Halima, O. I., Ilaich, H., Kerfati, A., Naaman, M., & Jhad, I. (2021). Application of FAO-AquaCrop model in evaluating climate change impact on wheat productivity in the rainfed Zaer area. . . P.
- Hugues AYPHASSORHO (CGEDD) et Roland RENOULT (CGAAER). (2018). *Retenues de substitution d'irrigation dans les Deux-Sèvres. Rapport CGEDD n° 012308-01, CGAAER n° 18074.*
- INRA. (2018). *Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 version 3.2.8.0, 10/09/1998 (V1 éd.)*. Recherche Data Gov. <https://doi.org/10.15454/BPN57S>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023a). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1^{re} éd.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023b). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1^{re} éd.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- J-B Hansmann (Aquascop) M Marquié (CACG) S Garnier (CACG) D Douay (Calligée). (2021). *Définition de débits écologiques sur les « unités de gestion des volumes prélevables » des SAGE Sèvre Niortaise Marais Poitevin et Vendée.*
- LANOISELEE, C. (2021). *Évaluation des actions pour le retour à une gestion quantitative équilibrée de la ressource en eau sur le Marais poitevin, bassins Lay, Vendée et Autizes.*
- Le Bas, C. (2018). *Carte de la Réserve Utile en eau issue de la Base de Données Géographique des Sols de France (V2 éd.)*. Recherche Data Gov. <https://doi.org/10.15454/JPB9RB>
- Le Bas, C. (2021). *Carte de la profondeur du sol issue de la Base de Données Géographique des Sols de France (V1 éd.)*. Recherche Data Gov. <https://doi.org/10.15454/7ZDND6>
- Le préfet de la Vendée. (2006). *Direction départementale de l'agriculture et de la forêt de la Vendée Arrêté N° 06-DDAF-5 Autorisant la réalisation de dix réserves de substitution de prélèvements sur les ressources naturelles du bassin des AUTISES.*
- LEPERCQ, LALOUX. (2018). *Des réserves de substitution associées à une gestion collective de la ressource en eau pour protéger les milieux fragiles.*
- M. THINON-LARMINACH, F. BICHOT. (2013). *BRGM/RP-62393-FR. Second avis technique sur le dossier d'étude d'impact relatif à la création de réserves de substitution (ASA Boutonne, 17).*
- Marie-Odile Bancal, Philippe Gate. (2010). Changement climatique et culture du blé : L'essentiel des impacts. In *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces.*
- Michel Normand, Jean Lavie. (2001). *BRGM/RP-51179-FR. Note d'orientation sur la méthodologie à développer pour étudier l'impact des retenues de substitution sur la ressource en eau en région Poitou-Charentes.*
- Mots de l'agronomie INRAE, « https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php/Fichier:MotsAgro_Ados_etc_les_mots_1.jpg », consulté le 18/06/23.
- Nadine Brisson. (2010). Changement climatique et cultures de maïs et de sorgho grains : L'essentiel des impacts. In *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces.*
- Nathan, R., Lowe, L., & Merz, S. K. (2012). The hydrologic impacts of farm dams. *Australian Journal of Water Resources*, 16(1).
- Organisation mondiale de la Santé. (2012). *Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume II Utilisation des eaux usées en agriculture.*
- P. BOUTON et P. BRANGER. (2007). *Notice explicative de la feuille Coulonges-sur-l'Autize À 1/50 000.*
- Paul-Henri MONDAIN. (2008). *CALLIGEE_N08-85138-C. Expertise des objectifs du projet de SDAGE de la ressource en eau sur la bordure Nord du Marais poitevin vendéen, bassins du Lay, de la Vendée et des Autizes, et proposition de principes de gestion. Phase 3 : Etude d'un cadre de gestion des nappes du Sud-Vendée compatible avec les enjeux écologiques et économiques.*
- Pellerin, F.-M. (2004). *La position de la Coordination pour la Défense du Marais Poitevin sur les projets de retenues dites de substitution.*
- Pellerin, F.-M. (2005). *Element d'analyse et conclusion sur l'enquête publique préalable à la déclaration d'intérêt général et à la demande d'autorisation au titre de la législation sur l'eau et les milieux aquatiques concernant le projet de création de 10 réserves de substitution sur le secteur des Autizes.*
- Philippe HUET, Xavier MARTIN. (2003). *Le drainage dans le Marais poitevin.*
- Pichot, M. (2019). *Mémoire de fin d'études : Diagnostic agraire du plateau de Fontenay-le-Comte.*
- Pierre Alphandéry & Bernadette Lizet. (s. d.). *Du paysan à l'agriculteur : Le paysage sécularisé.*
- Pierre-Etienne BISCH (préfet de région honoraire) Louis HUBERT (CGEDD), Claude MAILLEAU (CGAAER), Florence DENIER-PASQUIER (FNE) et Luc SERVANT (APCA). (2018). *Cellule d'expertise relative à la gestion quantitative de l'eau pour faire face aux épisodes de sécheresse. Rapport CGEDD n° 011865-01.*
- Potes, M., Rodrigues, G., Penha, A. M., Novais, M. H., Costa, M. J., Salgado, R., & Morais, M. M. (2018). Use of Sentinel 2 – MSI for water quality monitoring at Alqueva reservoir, Portugal. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 380, 73-79. <https://doi.org/10.5194/piahs-380-73-2018>

- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., & Morel, S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92-107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- Raes, D., Fereres, E., García Vila, M., Curnel, Y., Knoden, D., Çelik, S. K., Ucar, Y., Türk, M., & Wellens, J. (2023). Simulation of alfalfa yield with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 284, 108341. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108341>
- SAGE SNMP (2022). *Réunion de la Commission Locale de l'Eau du SAGE Sèvre Niortaise Marais poitevin du 3 octobre 2022 Relevé de conclusions*.
- Romain Roche. (2010). Complexité des évolutions du rendement des cultures. In *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces*.
- Roman Dobarco, M., Bourennane, H., Arrouays, D., Saby, N., Cousin, I., & Manuel, M. P. (2022). *Propriétés de granulométrie (argile, limons, sables) et d'éléments grossiers pour la France métropolitaine au pas de 90 m (V1 éd.)*. Recherche Data Gouv. <https://doi.org/10.57745/N4E4NE>
- ROUSSEL, P. (2001). *Un projet pour le Marais poitevin*.
- ROUXEL E., BICHOT F., PINAULT J.-L. (2007). *RP-55505-FR. Recherche d'indicateurs de gestion pour les eaux souterraines—Bassins vendéens au Nord du Marais Poitevin*.
- Roy. (1988). *Compte-Rendu des Travaux de Forages et de pompages*. Info-Terre.
- Roy, C. (1987). *Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine Jurassique du sud de la Vendée*.
- Saby, N. P. A., Lemerrier, B., Arrouays, D., Leménager, S., Louis, B. P., Millet, F., Schellenberger, E., Squidant, H., Swiderski, C., Toutain, B. F. P., Walter, C., & Bardy, M. (2015). Statistics of the National soil test database of France [jeu de données]. In *Supplement to : Saby, NPA et al. (2015) : Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. Étude et Gestion des Sols (Association Française pour l'Étude du Sol http://www.afes.fr), 21(1), 141-150, hdl:10013/epic.43358.d002. PANGAEA. https://doi.org/10.1594/PANGAEA.831688*
- Saby, Nicolas; Baize, Denis; Duigou, Nelly; Toutain, Benoît; Arrouays, Dominique. (2019). *Statistiques spatio-temporelles par petite région agricole des teneurs en ETM et de propriétés pédologiques issues d'observations collectées dans le cadre du programme BDETM*. Recherche Data Gouv, V2.
- SAFEGE. (2004). *Etude visant à élaborer le schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) de la Sèvre Niortaise et du Marais poitevin*.
- SAGE Garonne, « <https://www.sage-garonne.fr/sage/la-portee-juridique-du-sage/> », consulté le 06/06/23.
- SAGE SNMP (2008). *Projet de plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatique*.
- Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2016-2021 Bassin Loire-Bretagne*. (2015).
- Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2010-201 Bassin Loire-Bretagne*. (2009).
- Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2022-2027 Bassin Loire-Bretagne* (2022).
- Schmitt, C. (2021). *Irrigation du Maïs grain*. Chambre Agriculture de Vienne.
- Senthilkumar, K., Bergez, J.-E., & Leenhardt, D. (2015). Can farmers use maize earliness choice and sowing dates to cope with future water scarcity? A modelling approach applied to south-western France. *Agricultural Water Management*, 152, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.004>
- Sobaga, A. (2023). *Assessment of the ISBA Land Surface Model soil hydrology using four closed-form soilwater relationships and several lysimeters* [Preprint]. Vadose Zone Hydrology/Modelling approaches. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-248>
- Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruíz-Verdú, A., Delegido, J., Soria, J. M., Peña, R., & Moreno, J. (2021). Validation of Water Quality Monitoring Algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in Mediterranean Inland Waters with In Situ Reflectance Data. *Water*, 13(5), 686. <https://doi.org/10.3390/w13050686>
- Taranu, I. S., Somot, S., Alias, A., Boé, J., & Delire, C. (2023). Mechanisms behind large-scale inconsistencies between regional and global climate model-based projections over Europe. *Climate Dynamics*, 60(11-12), 3813-3838. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06540-6>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Willems, P., & Semenov, M. A. (2014). Comparing climate change impacts on cereals based on CMIP3 and EU-ENSEMBLES climate scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.04.017>
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system : A 50-YEAR HIGH-RESOLUTION ATMOSPHERIC REANALYSIS OVER FRANCE. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Vincent Benjamin, A. B. R., Germain, A. M., & Jacques, D. E. (2022). Contribution à la Caractérisation des Sédiments Superficiels Quaternaires de la Partie Sud du Marais Poitevin (PoitouCharentes-France). *European Scientific Journal, ESJ*, 18(40), 211. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n40p211>
- Wellens, J., Raes, D., Fereres, E., Diels, J., Coppys, C., Adiele, J. G., Ezui, K. S. G., Becerra, L.-A., Selvaraj, M. G., Dercon, G., & Heng, L. K. (2022). Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Agricultural Water Management*, 263, 107491. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107491>

Annexes

1. Diagraphies par imageries au site H+ de Poitiers



- Fracture ouverte
 ● Fissure - Fracture
 ● Schistosité
- Filons - Veines
 ● Stratification
 ● Fracture avec remplissage
- Structure indéterminée

Figure 60: Diagraphies par imagerie formation du Bathonien/Bajocien au site H+ de Poitiers (Source : Site H+, Poitiers).

2. Perte dans le lit de la Smagne

Une perte dans le lit de la Smagne, située en amont d'une chaussée (la retenue de Mainclaye), se serait mis en place le 8 juillet 1986, jusqu'à ce que la perte soit colmatée avec de l'argile compactée l'avenant absorbé l'entièreté du volume retenu par le barrage et ensuite du débit de la Smagne. Le phénomène a pu également être observé par une nette remontée du niveau piézométrique du captage AEP du Chatelard situé à 1600 m. à l'Est, alors que la tendance aurait dû être à la baisse pour cette saison (Roy, 1987). Pour essayer d'expliquer ce phénomène, un forage de reconnaissance a été réalisé sur la rive droite, à 25m de la perte, celui-ci a montré que le niveau de la nappe du Lias inférieur se maintenait à plus de 10 en dessous de la cote du lit pendant la période d'irrigation (Ibid). C. Roy explique que la faible couverture argileuse du fond du lit a cédé par l'action conjuguée de la charge que représentait la retenue, de l'important rabattement de la nappe et de la fracturation des calcaires (1987).

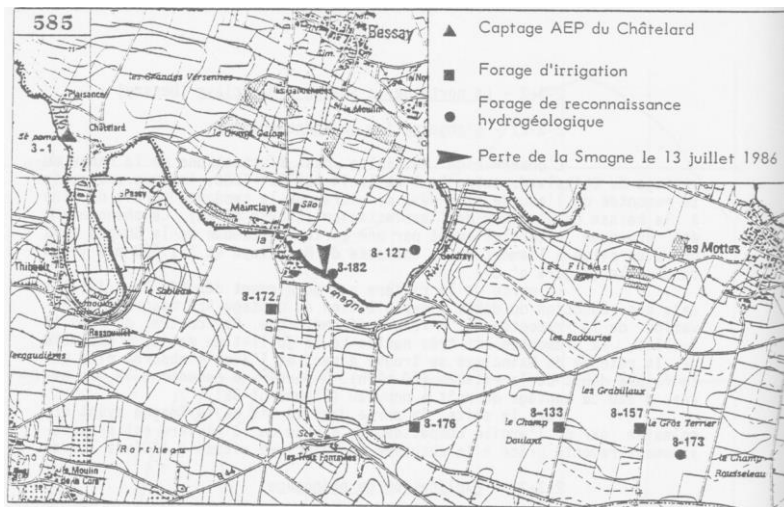


Figure 61: Localisation des forages et de la perte de la Smagne. Communes de Bessay et de St Jean-de-Beugn  – Echelle 1/25000 me (Roy, 1987).

Dès l'arrêt des pompages dans la région des Mottes au S-E, le niveau piézométrique est remonté pour venir s'équilibrer avec le niveau de la Smagne, ainsi on observe une relation relativement directe entre la perte dans le lit de la Smagne, le captage AEP rive droite et les captages pour l'irrigation via une zone fracturée de direction NW-SE. Un essai de pompage a été réalisé en dehors des périodes d'irrigation sur deux forages agricoles au S-E (585-8-133 et 585-8-157), on remarque que c'est selon l'axe de fracturation NW-SE que s'organisent les rabattements observés, ainsi l'ouvrage le plus proche, situé quelque centaine de mètres plus au Nord (8-127) n'accuse aucune baisse alors que l'on observe une baisse de 35 cm sur le forage (8-182) après 400 mn de pompage (Roy, 1987). Les chroniques piézométriques des deux forages (8-133 et 8-182) sont très précisément corrélées, ce qui confirme la présence d'un conduit karstique via lequel les transferts de pressions se font de manière instantanée, des essais de lâcher de barrage provoquent également des variations piézométriques similaires entre les deux forages pourtant disant de 1.5 km (Roy, 1987).

Ainsi, bien qu'il soit situé à 3.500 mètres, un groupe de forage a pu interférer avec un captage AEP par l'intermédiaire d'un axe faillé et drainant de direction NW-SE, et l'exploitation des eaux souterraines en période d'étiage a pu créer une dépression piézométrique à même de provoquer l'ouverture d'un aven (Roy, 1987).

3. Estimations des volumes prélevables

3.1. CACG

Le bureau d'étude de la Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) a calculé des volumes prélevables en soustrayant à des chroniques de débits naturels non influencé reconstituées, les prélèvements qu'il était possible de réaliser jusqu'à atteindre le DOE. Les résultats obtenus pour le bassin des Autizes, pour lequel il n'existe pas de soutien de débit artificiel, sont de l'ordre de 0,4 M.m³ en année quinquennal sèche et 0,6 M.m³ en année médiane, pour un DOE de 150 l/s (CACG, 2002). Un objectif moins ambitieux de 100 à 50 l/s pourrait au mieux doubler ces volumes prélevable selon les auteurs (CACG, 2002).

3.2. Calligée

Le bureau d'étude Calligée a produit une expertise sur les objectifs du projet de SDAGE de la ressource en eau sur la bordure nord du Marais Poitevin vendéen, pour le compte du conseil général de la Vendée (Mondain, 2008). La méthode proposée pour estimer les volumes prélevables repose sur le principe de la cote d'équilibre qui s'établit temporairement au printemps et s'observe sur les chroniques piézométriques des années 1990 à 2005. Elle correspond au niveau d'équilibre entre la nappe et le marais, au-delà de laquelle une rupture nette est observée systématiquement au début de la période d'irrigation à partir du 1^{er} juin. Mondain (2008) déduit qu'en l'absence de précipitation, la nappe du Dogger se comporte comme un réservoir, et il devrait exister une relation linéaire entre les volumes pompés et la baisse de niveau de la nappe à partir de début juin.

Assumer une relation linéaire entre ces deux facteurs permet de déterminer un volume spécifique exploité par mètre de rabattement de la nappe. Ainsi, grâce à la connaissance des volumes prélevés par quinzaine, le bureau d'étude a pu calculer des volumes spécifiques par mètre de rabattement sur des années de références peu influencées par des précipitations estivales (2000, 2003, 2005 et 2006) sur les secteurs du Sud-Vendée.

Calligée obtient des volumes exploitables en été 4 années sur 5, de l'ordre de 3,4 M.m³ pour un niveau piézométrique de crise de 2,5 m. NGF à Oulmes, et de 2,25 M.m³ pour un niveau piézométrique de crise de 1,6 m. NGF à Benet (Aziré). Ces volumes prélevables sont donc entre 3.6 et 5.6 fois plus importants que ceux estimés par la CACG avec d'autres critères.

3.3. BRGM TEMPO

Afin de mettre en évidence des paliers, de définir des indicateurs de gestions de niveaux piézométriques pour les eaux souterraines de la plaine vendéenne au Nord du Marais Poitevin en période d'étiage, et d'avancer des ordres de grandeurs de volumes prélevables, le BRGM a analysé les chroniques piézométriques et hydrométriques disponibles sur base du logiciel TEMPO (Rouxel et al., 2007), (Bichot et Pinault, 2007) et (Bichot, 2007). Les auteurs ont pu modéliser des fonctions de transferts entre les niveaux piézométriques représentatifs de l'état de la recharge de la nappe, les débits du cours d'eau et les conditions météorologiques.

Comme illustré sur la figure ci-dessous, pour la même période de retour des précipitations, le modèle estime le volume disponible en intégrant l'écart entre la courbe des débits observés (3), et la courbe pseudo-naturelle modélisée (1) jusqu'à atteindre la courbe théorique d'évolution vers le débit objectif d'étiage (2). Ainsi le calcul des volumes disponibles d'avril à août a été réalisé pour différentes périodes de retour et différents débits objectif d'étiage.

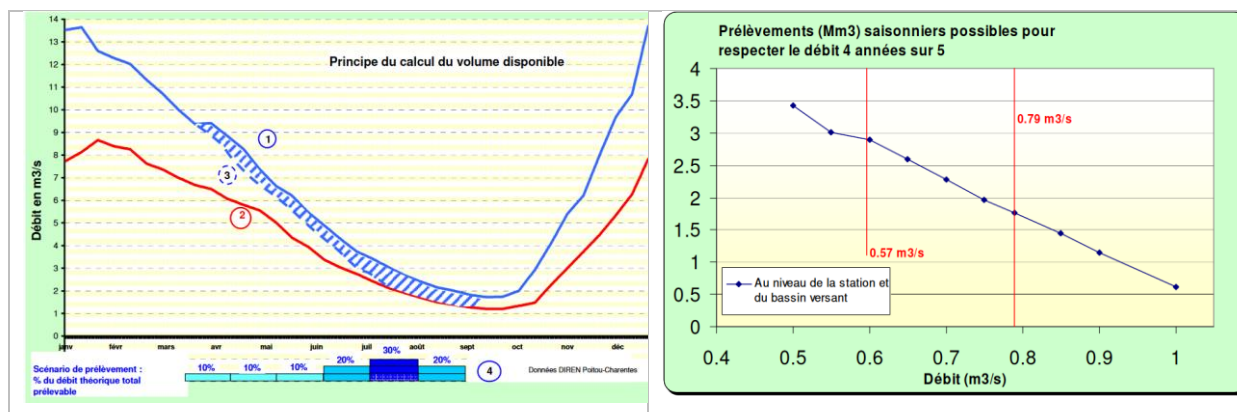


Figure 27: Principe du calcul du volume disponible avec TEMPO (Bichot et Pinault, 2007)

Le calcul donne une courbe proche d'une droite qu'on peut visualiser sur la figure ci-dessus à droite, elle donne une idée de l'influence du choix des débits objectifs d'étiage sur les volumes disponibles.

Au niveau des débits de l'Autize enregistré à St-Hilaire-des-Loges, le QMNA5 non influencé que le modèle restitue pour une période de retour 5 ans sec, est de l'ordre de 0.25 m³/s. Avec un objectif de débit d'étiage fixé à 0.25 m³/s, le logiciel restitue un volume prélevable d'1M.m³ en année médiane (une sur deux) sur l'ensemble du bassin versant amont de la station de St-Hilaire. C'est un chiffre que les auteurs proposent de doubler pour être transposé à l'entièreté du bassin versant de l'Autize. Le volume descend à 0 en année quinquennale sèche.

3.4. Groupe d'expert

C'est le manque de cohérence entre les directions prises par les différentes CLE (Commission Locale de l'Eau) des trois SAGE qui a poussé les services de l'Etat des deux régions et des trois départements ainsi que le cabinet du ministère de l'écologie et du développement durable, à commander un travail d'expertise en 2007. Il s'agissait d'apprécier le contenu des SAGEs au regard des objectifs qui étaient de retrouver des fréquences et des durées d'assecs qui permettent le bon état des écosystèmes des zones humides, pallier au phénomène d'inversion des flux entre nappes et marais par endroit ainsi qu'au tarissement des sources de débordements.

La CLE du SAGE de la Sèvre Niortaise et du Marais Poitevin (SNMP) s'était jusque-là donné comme principe de gérer les nappes aquifères afin que les cotes piézométriques soient toujours supérieures aux cotes des eaux superficielles des fossés et des cours d'eau au niveau des points de contact entre nappes et marais (Groupe d'expert, 2007).

Selon les experts, cela impliquerait que les niveaux piézométriques objectifs de crise et de fin d'étiage soient fixés à des niveaux supérieurs ou égaux aux niveaux objectifs d'étiage et de crise des zones nodales les plus proches. Cela leur semble irréalisable, car cela impliquerait des volumes prélevables très faibles et donc une baisse des prélèvements trop importante, avec une réduction drastique de l'irrigation. Ainsi, afin de réduire, à minima, la fréquence et l'ampleur des flux d'eau du marais vers la nappe, selon le groupe d'expert, il est nécessaire que les niveaux piézométriques objectifs soient les plus proches possible des niveaux objectifs aux points nodaux. Le groupe rappelle également à ce sujet, que les niveaux d'eau dans le marais s'effondrent réellement uniquement lorsque la baisse des niveaux piézométrique est d'une durée et d'une ampleur suffisante (Groupe d'expert, 2007).

Le groupe d'expert (2007) a classé en trois classes les piézomètres présents sur le Marais Poitevin et les bassins qui l'alimentent :

- 1 : les piézomètres situés directement à proximité du marais, pour lesquels il a jugé pertinent d'établir une piézométrie objective de début et de fin d'étiage (POE), car on y observe un phénomène de palier au début de l'été qui correspond à l'équilibre qui se met en place entre le

niveau des eaux superficielles et la nappe et se maintient tout le long de l'été en l'absence de prélèvement

- 2 : les piézomètres qui sont situés proche d'un affluent du marais, et présentent une dynamique proche des premiers, avec un niveau d'équilibre autour duquel se définit si c'est la nappe qui alimente et soutient le cours d'eau ou l'inverse, qui se maintient en l'absence de prélèvement, pour lesquels il a également été jugé pertinent d'établir une PO de début et fin d'étiage
- 3 : les piézomètres qui sont situés en amont des bassins versants, sur lesquels ne sont pas observés les phénomènes de palier au début de la période estivale, la fixation d'une POE n'est pas souhaitable dans la mesure où ils semblent peu influencés par les prélèvements, ils représentent cependant des bons indicateurs de l'état de la recharge et pourraient être utilisés en gestion de crise

Pour le secteur des Autizes le groupe d'expert a résumé la dynamique réellement observée et celle restituée par la courbe pseudo-naturelle donnée par le modèle TEMPO du BRGM (sans l'influence des prélèvements agricoles), des piézomètres d'Aziré (Benet) et du Grand Nati (Oulmes), afin de proposer des valeurs pour fixer les niveaux piézométriques d'étiage.

Piézo-mètres	Palier fin printemps (m. NGF)	Cote moyenne estivale (2000- 2005) (m. NGF)	Cote pseudo naturelle TEMPO estivale (m. NGF)	POEd (m. NGF)	POEf (m. NGF)	PCR (m. NGF)
Aziré (Benet)	2,4	1,2	2,4	2,4	1,9	1,6
Grand Nati (Oulmes)	5	2,4	4,2	4,6	3	2,5

Tableau 11 : Niveau piézométrique objectif pour les Autizes (Groupe d'expert, 2007).

Sur base de ces niveaux, le groupe d'expert a proposé un ordre de grandeur de volume prélevable en attendant les résultats d'un modèle maillé. Le calcul consiste à appliquer un coefficient de réduction aux prélèvements d'une année proche d'une quinquennale sèche.

Ainsi, pour les Autizes, le volume prélevé en 2003 de 5.51 M.m³ a provoqué un rabattement de nappe de l'ordre -3,4 m (Grand-Nati) et -2 m (Aziré). Pour que le rabattement ne dépasse pas la POEf, il aurait fallu limiter la baisse de niveau piézométrique à -1,2 m (35% de -3,4) au Grand-Nati et -0,6 m (30% de 2) à Aziré. C'est donc un coefficient de réduction moyen de 32% qui est appliqué au volume prélevé en 2003, afin d'atteindre la cote de piézométrie de fin d'étiage, pour arriver à un volume prélevable de l'ordre de 1.76 M.m³ pour le bassin versant des Autizes.

3.5. BRGM Modélisation Marthe

Les objectifs et les seuils réglementaires définis par le groupe d'expert ont été repris dans le projet de SDAGE Loire Bretagne (2010-2015). La DIREN Poitou Charentes et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne ont demandé au BRGM de réaliser une étude par modélisation afin de donner des estimations de l'apport des nappes au marais, et des éléments afin de quantifier les volumes « prélevables » au regard des objectifs et des seuils réglementaires défini par le SDAGE Loire Bretagne.

Le modèle « Marais Poitevin » a été construit pour couvrir la totalité des bassins versants qui alimentent le Marais, les mailles font 1 km de côté mais sont subdivisées en 9 (333m de côté) à la périphérie du Marais, afin de mieux représenter les relations nappes-rivières ainsi que les prélèvements, notamment sur la zone de contact entre le Dogger et le bri¹⁵. C'est le code MARTHE (Modélisation d'Aquifères par

¹⁵ Comme l'ont souligné les deux ingénieurs mandatés par les ministres de l'agriculture et du développement durable en 2018, un manque de ce modèle est de ne prendre en compte que l'apport des nappes au marais par l'intermédiaire des cours d'eau, et pas l'ensemble des points de débordements plus diffus ((Ayphassorho (CGEDD) et Renoult (CGAAER)).

un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements), qui est utilisé pour la modélisation, sur base de la méthode aux différences finies.

Globalement le modèle retranscrit en moyenne 86% l'atteinte ou non des seuils POEd, POEf, et PCR. Selon Olivier Douez, (2010), le modèle permet donc d'obtenir des réponses satisfaisantes aux regards des objectifs de gestions fixés, tant en termes de niveaux que de dates.

Sur la figure 15 ci-dessous on retrouve les volumes proposés par les auteurs pour respecter 4 années sur 5 les objectifs inscrit dans le SDAGE, notamment pour garantir l'alimentation du marais et le maintien des niveau objectifs de niveaux dans les canaux au 15 juillet (les volumes sont donnés à +/- 10 % près, pour tenir compte des sources d'incertitudes).

Piézomètres	POEd m. NGF	POEf m. NGF	PCR m. NGF	Zone de gestion	Volume printemps Mm ³	Volume été Mm ³	Volume total Mm ³
Azéré	2.3	1,90	1.6	Autize	0,30	2,00	2.3
Grand-Nati	4.6	3,00	2,50				

Tableau 12: Volumes prélevables pour respecter les objectifs du SDAGE 2010-2015 (Duez et al., 2010).

Une dernière étude (Compère et al., 2020), a été réalisée à la demande de l'EPMP, et à la suite de l'annulation en 2019 par le tribunal de Poitiers de l'AUP (de 2016). Elle s'est basée sur un nouveau schéma de répartition des prélèvements pour l'irrigation, afin d'estimer un volume prélevable estival qui permette de respecter les objectifs piézométriques sur quatre unités de gestion dont celle de l'Autize sédimentaire.

La nouvelle configuration prend en compte l'évolution des prélèvements agricoles, avec notamment la substitution, une nouvelle répartition des volumes de prélèvement et pour le piézomètre du Grand-Nati un niveau objectif de fin d'été (POEf) fixé à 3,2 m. NGF. Pour le secteur des Autizes la nouvelle répartition implique principalement la fermeture de deux forages à proximité direct du piézomètre du Grand-Nati ce qui a permis de modéliser un respect suffisant de la POEf pour un volume inchangé.

Pour respecter une valeur de 3.2 m. NGF 9 années sur 12, un volume prélevable printemps/été entre 2,36 M. m³ et 2.89 M. m³ est estimé, et entre 2.1 M. m³ et 2,62 M. m³ pour un respect 10 années sur 12 (Compère et al., 2020).

4. Protocole de gestion des Autizes (2016)

Selon le protocole, on distingue 4 temporalités :

- Avant le franchissement du seuil d'alerte, la limitation est volontaire et s'appuie sur un plan de fractionnement en période qui est notifié à chaque irriguant.
- A partir du franchissement du seuil d'alerte, les règles de limitations sont appliquées
- A partir du franchissement du seuil d'alerte renforcée, les dispositions de l'arrêté cadre sont intégrées en plus des limitations prévues
- A partir du franchissement du seuil de coupure, tous les prélèvements sont interdits y compris pour les agriculteurs connectés directement aux réserves

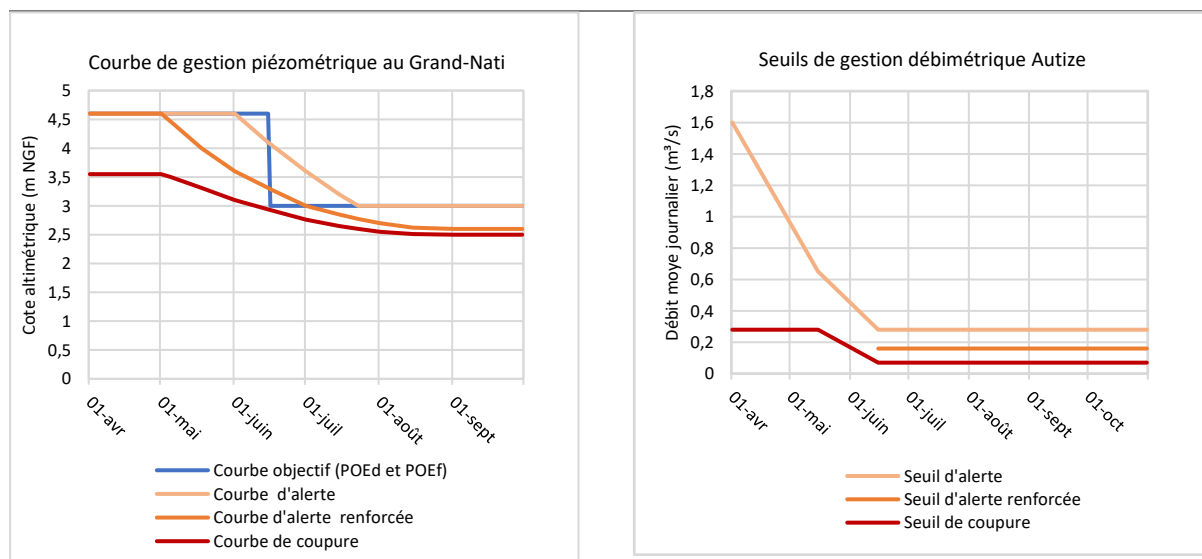


Figure 62 : Protocole de gestion des Autizes (EPMP 2016).

Au printemps, l'indicateur à respecter entre le 1^{er} avril et le 15 juin, est le POEd (4.6 m NGF au piézomètre du Grand Nati à Oulmes). Si le niveau piézométrique passe en dessous du POEd avant le 1^{er} mai, les prélèvements sont limités à 15% du volume total prélevable (6.6 Mm³).

La répartition du volume de printemps entre irrigant n'est pas pré-établie. Un relevé obligatoire est imposé le 1^{er} juin, pour estimer la part des volumes consommés au printemps et déterminer les volumes restant disponibles pour les quinze à venir.

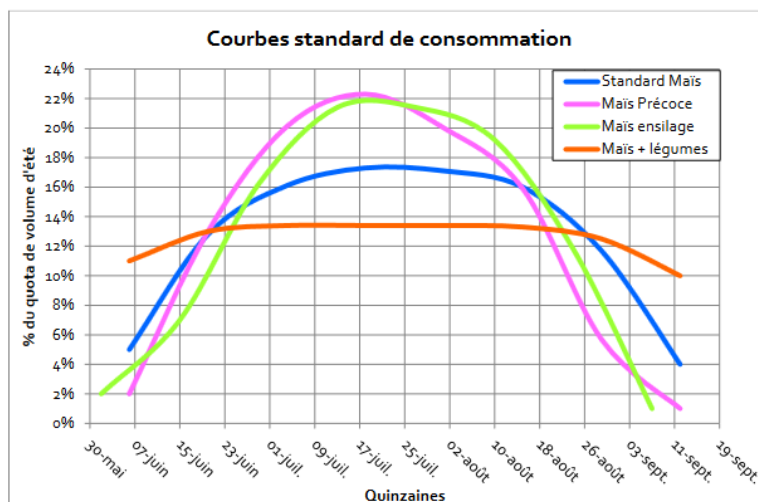


Figure 63: Courbe standard de consommation (Protocole 2016 de gestion des Autizes, EPMP).

En été, à partir du 1^{er} juin la consommation est définie à partir d'une courbe standard qui est modulée par grand type de cultures (maïs précocé, maïs tardif ensilage, standard maïs, maïs + légumes), chaque préleveur choisit sa courbe. Celles-ci sont définies au printemps, en fonction des dates de semis observées, et peuvent évoluer en fonction de la météo.

Ainsi, en été :

- si l'on passe sous la courbe d'alerte, le volume prélevé ne peut dépasser celui indiqué par la courbe standard choisie et une limitation jusqu'à 40% du volume peut être appliquée.
- si l'on passe sous la courbe d'alerte renforcée une restriction de minimum 40% est appliquée.
- si l'on passe sous la courbe de coupure, aucun prélèvement n'est possible sauf dérogation

Le calcul des volumes alloués en cas de réduction se fait par :

$$V = (V_{\text{annuel}} - V_{\text{printemps}}) * \% \text{ courbe} * (1 - \% \text{ restriction})$$

5. Détails techniques des réserves de substitution

Comme illustré sur la figure ci-dessus, les réserves sont entourées d'une digue périphérique composée par les remblais compactés issus de la fraction utilisable des matériaux provenant du terrassement de la cuvette ou zone centrale. Au niveau des premiers horizons du sol, on retrouve les calcaires de dimensions variables sous une couverture limono-argileuse assez peu épaisse en plaine (0.2m) et plus importante en fond de vallées (3 à 4m), après 1 à 3 m. d'horizon supérieur on retrouve ensuite un calcaire massif qui nécessite des moyens plus lourds pour être extraits (CACG, 2005).

Les réserves sont toutes bâchées par une géomembrane en EPDM pour assurer l'étanchéité du fond et des parois latérales de la réserve, à l'exception du site de Damvix, pour lequel les remblais compactés composée en grande partie d'argiles ont pu assurer une étanchéité (CACG, 2005). Les crêtes des digues ont une largeur de 3m afin de pouvoir faire circuler un engin, et 50 cm sont nécessaires au repli de la membrane afin d'assurer son ancrage. Une certaine pente intérieure et extérieure est nécessaire pour assurer la tenue des talus, qui dépend de la proportion de matériaux fin du volume total utilisé (CACG, 2005).

Plusieurs mesures techniques sont également nécessaires afin de limiter les risques liés aux effets des sous-pressions liées aux remontées de la nappe. Ainsi, une couche de transition est installée entre le contact entre la sous-face de la membrane et de la fondation, dans laquelle est mis en place un réseau de drainage reliés par des collecteurs périphériques, ou si ce n'est pas possible un clapet de décharge est mis en place au sein même de la retenue (CACG, 2005). Ces volumes drainés à partir de la nappe affleurante sont ensuite collectés et alimentent les réserves.

Des ouvrages annexes sont également nécessaires notamment pour assurer la vidange en cas d'incident, de façon à rapidement abaisser le niveau du plan d'eau et vidanger vers le cours d'eau à travers un fossé d'évacuation, mais également une canalisation de trop-plein pour éviter des débordements (vidange totale en 9 jours) ainsi qu'un système de vannes pour assurer les fonctions de distribution et de remplissage (CACG, 2005).

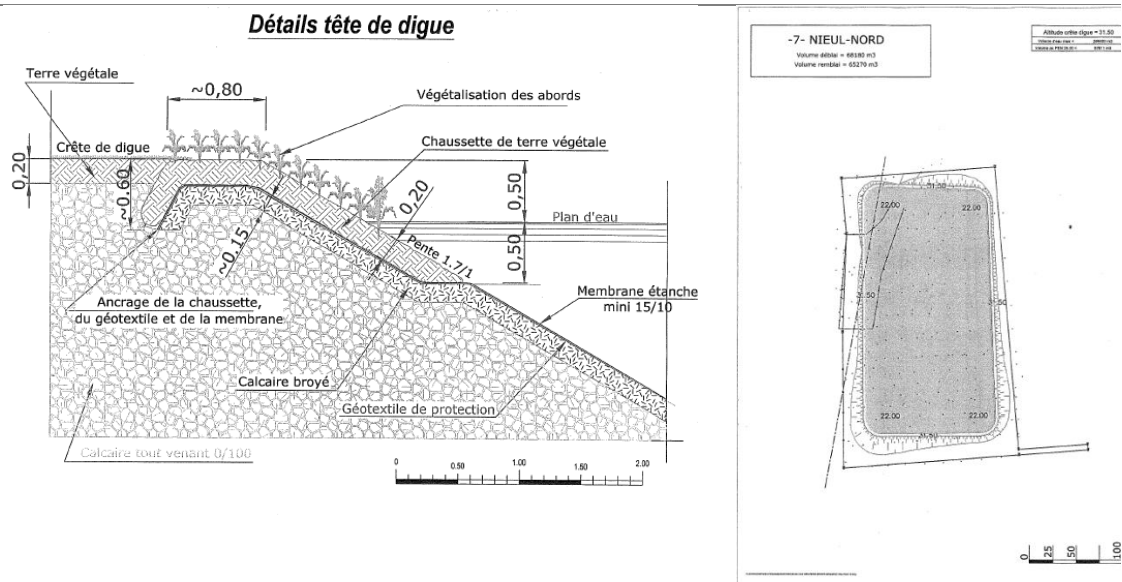


Figure 64 : Détails technique des réserves de substitution (CACG, 2005).

6. Etudes d'impact BRGM (2010)

En ce qui concerne l'impact de la substitution sur la nappe du Dogger, ce sont les résultats du modèle pour janvier 2005 qui sont présentés. Les auteurs précisent que l'impact est faible globalement sur la nappe du Dogger. Sur la figure ci-dessus, les niveaux piézométriques modélisés avec et sans pompages sont représentés. On observe un recul de l'ordre d'un kilomètre entre l'isopiez 15 m. NGF de la piézométrie simulant les prélèvements hivernaux de substitution (en bleu sur la carte) et celle sans prélèvements (en gris). En dehors de ce point, on observe peu de variation pour ce mois de janvier 2005 en valeur moyenne mensuelle.

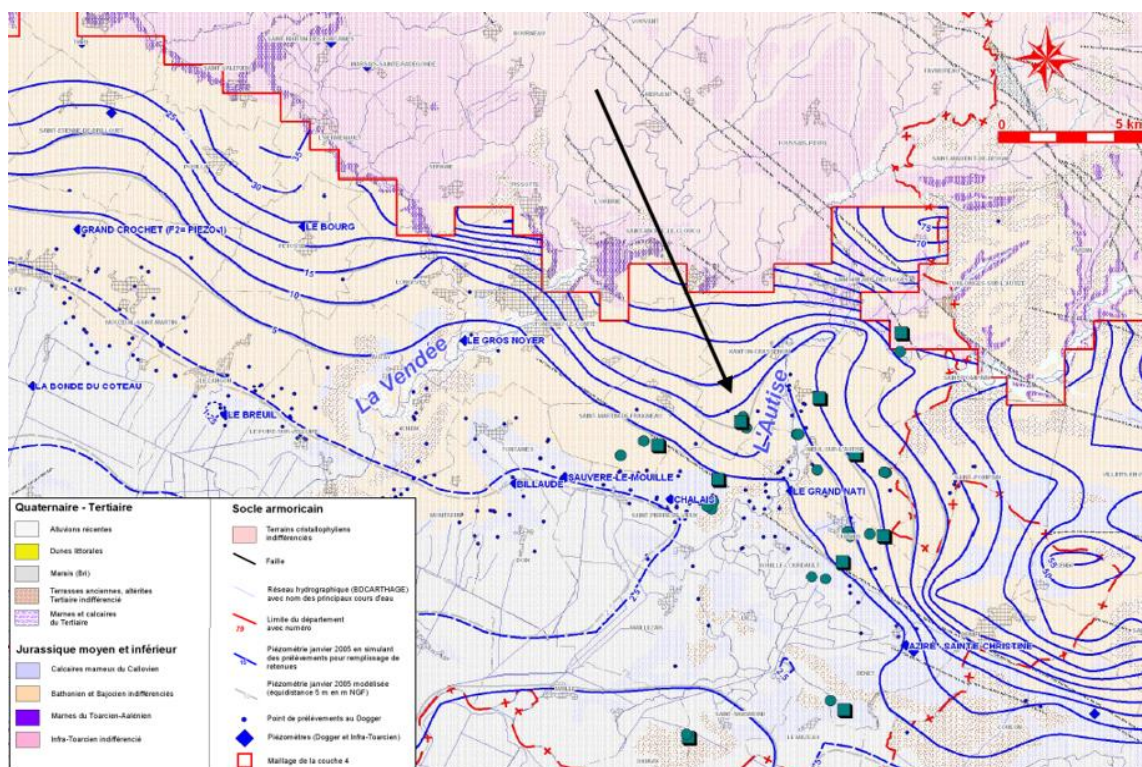


Figure 65: Comparaison des niveaux piézométriques de la nappe du Dogger de janvier 2005 restitués par le modèle avec et sans pompage hivernaux pour le remplissage de retenues de substitution (Domez et al., 2010)

Les résultats avec retenues sont comparés avec les résultats du calage modélisé (par rapport aux observations réelles le modèle a du mal à reproduire les variations dans la totalité de leurs amplitudes et surtout pour les niveaux hauts).

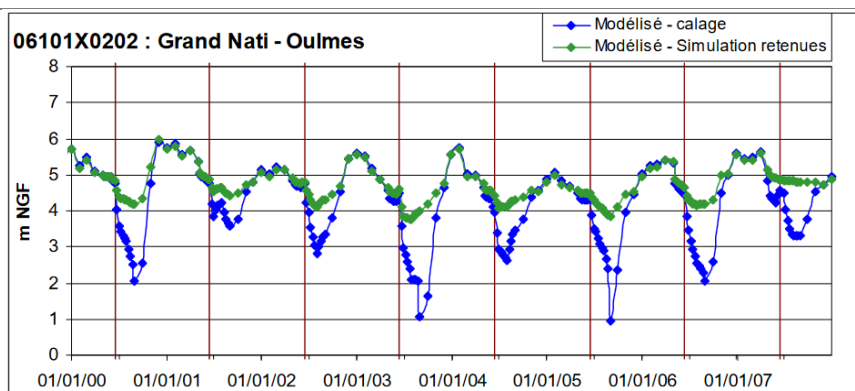


Figure 66: Impact de la mise en place des retenues sur le bassin de l'Autize sur le piézomètre de grand-Nati (Domez et al., 2010)

Les auteurs ont également estimé l'impact de la substitution sur le débit de l'Autize modélisé sur un point en bordure du marais, les simulations présentent des résultats de l'ordre d'une augmentation de 50 à 100 l/s pour la période estivale par rapport aux résultats du calage.

Les auteurs précisent que par un rapide calcul on comprend que les prélèvements hivernaux qui concernent directement l'Autize ont des impacts négligeables sur le débit, de l'ordre de 300 000 m³ et de 30 l/s (Douez et al., 2010).

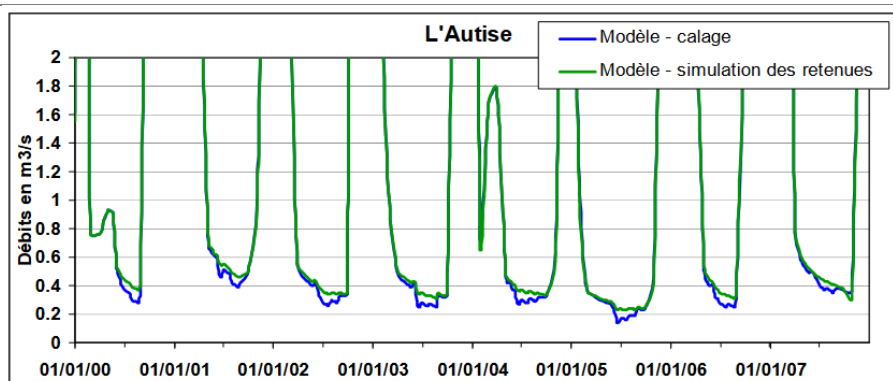


Figure 67: Comparaison des débits de l'Autize entre le modèle calé et la simulation avec retenues de substitution sur un point fictif en bordure du Marais (Douez et al., 2010)

La réserve de Nieul Nord est remplie par deux pompes, une prélevant en eau de surface et une autre en eau souterraine, sans connaître la répartition des volumes pompés entre les deux, nous pouvons arbitrairement prendre la moitié, soit 160000 m³ de volume utile. Ainsi, il faut maintenir un débit de 28 l/s pendant 1600 heures (66 jours et 16h), pour remplir la réserve de Nieul Nord à moitié avec des eaux de surfaces au débit de pompage autorisé (100 m³/h soit 28 l/s). Si l'on tient pour acquis que la réserve de St-Hilaire (174000 m³) est remplie avec un débit autorisé équivalent (entre 80 à 130 m³/h), le débit est certainement de l'ordre de (28x2) soit 60 l/s.

Même cumulé, ces débits restent négligeables au vu du débit moyen mensuel de l'Autize sur la période de hautes eaux. Néanmoins, lors de l'été 2022, le débit de l'Autize est resté en dessous du seuil de remplissage de 0.45 m³/s entre le 08/05 et 17/11.

7. Qualité des eaux au sein des réserves de substitution

Des proliférations algales ont pu être observées au sein de certaines réserves depuis plusieurs années, cela s'ajoute au problème de développement de biofilms à l'intérieur des réseaux de distribution et d'irrigation, ce qui est problématique pour les irrigants car cela limite la pression (CONSULT'EAU, 2018).

7.1. Anticipation dans l'étude d'impact de la CACG (2005)

Le mode de raisonnement explicité dans l'étude d'impact des projets de substitutions des Autizes, est d'analyser la qualité des eaux utilisées pour le remplissage afin d'estimer la qualité probable des eaux stockées. Ainsi, selon les auteurs, les effets sur la qualité des eaux restituées par les réserves dépendent premièrement de la qualité des eaux stockées. C'est la concentration en éléments nutritifs et tout particulièrement le phosphore qui déterminerait le niveau trophique d'une réserve, le temps de séjour est un facteur pondérant de cette concentration (CACG, 2005). Les auteurs ont repris les résultats des analyses en eaux de surface réalisées par le Conseil Général de Vendée, dans le périmètre du projet, le facteur déclassant est systématiquement la concentration en nitrate, et celle-ci augmente à mesure que l'on se rapproche du marais.

Les résultats des analyses complémentaires effectuées au point des prélèvements prévu, sont présentés ci-dessous, ils montrent, selon les auteurs « une bonne qualité générale hors les nitrates, une absence de pollution par les produits phytosanitaires usuels » (CACG, 2005, p. 17). Les eaux de la nappe sont assez similaires au niveau des paramètres considérés.

Secteur	Autize amont	Le Mauvais	Canal de Reth
Date prélèvement	10/03/2005	10/03/03	10/03/03
NO ₃ mg/l	24.80	27.30	26.5
Ptot mg/l	< 0.05	< 0.05	< 0.05

Tableau 13 : Qualité des eaux aux points de pompages projetés (CACG, 2005).

Les auteurs concluent que le niveau trophique anticipé pour le projet ne correspondra pas à un développement excessif de peuplement d'algues phytoplanctoniques susceptible de produire des toxines, car les taux de phosphores sont faibles (de 0.05 à 0.2 mg/l) et l'eau devrait être renouvelée presque entièrement chaque année (CACG, 2005). Ce sont ces éléments qui permettent de classer le niveau trophique des eaux des réserves concernées comme mésotrophe à eutrophe.

Toujours selon les auteurs, cela impliquerait un développement non excessif de peuplement planctonique, qui se forment en plusieurs vagues successives annuelles, avec des cycles de croissance et de déclin. Ces cycles contribueraient à la différenciation verticale des conditions physico-chimiques dans la colonne d'eau au printemps et en été. La tranche superficielle de l'eau, dans laquelle domineraient des mécanismes chlorophylliens par lesquels les éléments nutritifs seraient absorbés, et la tranche d'eau plus profonde, où domineraient des mécanismes trophiques de décomposition bactérienne qui mèneraient à une situation d'anoxie au cours de l'été à la suite de la consommation de l'oxygène dissous (sans être contrebalancée par sa production via des métabolismes photosynthétiques ; CACG, 2005).

Ainsi la qualité des eaux stockées pourrait varier verticalement, parallèlement à la stratification thermique, avec des eaux en surfaces de meilleure qualité physico-chimique que les eaux profondes (CACG, 2005).

Selon les auteurs, le risque de toxicité potentiel peut être écarté notamment car :

- il est peu probable d'observer un développement de cyanophycées, dans la mesure où les eaux des réserves ne seraient pas caractéristiques de leur condition de développement à savoir des eaux hyper-eutrophes ou dystrophes avec une carence du milieu en azote
- la production de toxine par ses algues n'est pas systémique
- un contact direct ou une ingestion n'est pas envisageable dans la mesure où les réserves sont clôturées et interdites d'accès

7.2. Expertise 2018

Un expert a été mandaté en 2018 par la CACG, pour comprendre le phénomène de développement algales au sein de certaines retenues, identifier des leviers de gestions, les pistes de solutions adaptées et proposer un suivi pour anticiper ces phénomènes, mais également évaluer l'efficacité d'un curage de l'épais dépôt de sédiments qui s'est formé.

L'analyse de l'auteur se focalise sur les retenues d'Oulmes nord, de Saint-Pierre le Vieux et de Pouillé. Il résume la situation pour les retenues ainsi : la qualité se dégrade avec le stockage, car le pH augmente à la fois par effet d'eutrophisation et par dégazage du CO₂, avec l'évaporation le phosphore se concentre, et les algues prolifèrent. Ainsi l'eau des retenues, à la suite de son stockage, acquiert les caractéristiques d'une eau superficielle eutrophe (CONSULT'EAU, 2018).

Le fond des retenues d'Oulmes et de Saint-Pierre-le-Vieux est recouvert de sédiment verdâtre d'environ 10 cm d'épaisseur que l'expert qualifie de faiblement organique et tapissé de résidus secs de thalles de *Chara major*. C'est une algue de la famille de *Charophycées*, qui a également été observée sur les crépines de la réserve de Saint-Pierre, elle est indicatrice d'eau stagnantes à dureté élevée, fortement éclairée. Cette algue peut développer des thalles de plus de 100 cm, qu'elle va calcifier par bio-minéralisation, ce qui entraîne des débris relativement « cassants » (CONSULT'EAU, 2018).

L'auteur synthétise les conditions qui amènent à la prolifération (efflorescence ou bloom) des algues qu'on retrouve de base dans toutes les masses d'eau. Il faut une conjonction de facteurs abiotiques, comme un ensoleillement important, une colonne d'eau stable, une montée de la température (>15°C) et particulièrement un enrichissement de l'eau par les facteurs limitant que sont l'azote et le phosphore (>30µg/l) (CONSULT'EAU, 2018).

L'eutrophisation dans ces réserves se résume en trois étapes. La prolifération des algues entraîne une fluctuation du pH lié à la consommation en journée du gaz carbonique, et une fois leur cycle de vie achevé elles vont constituer une boue formée de lysat, riche en matière organique. L'auteur précise également que des germes saprophytes peuvent proliférer dans la boue en consommant beaucoup d'oxygène (CONSULT'EAU, 2018). La matière organique contenue dans la boue est minéralisée et au printemps suivant l'azote et le phosphore recyclé va s'ajouter aux concentrations apportées par la ressource, ainsi le processus d'eutrophisation est irréversible et va légèrement croître et s'intensifier petit à petit chaque année. Seul un curage est à même de ralentir le phénomène, en limitant le relargage de flux eutrophe, selon l'auteur (Ibid).

Un traitement chimique a déjà été réalisé, qui donnait des effets positifs seulement quelque temps, un traitement biologique à l'intérieur des canalisations a également été mis en place en 2018, avec des résultats « peu probants » (CONSULT'EAU, 2018).

Sur base des moyennes des résultats de quatre captages AEP du secteur, la ressource en eau pompée dans le milieu est qualifiée de riche en phosphore total (70µg/l en moyenne), en organophosphates (200µg/l en moyenne) et en nitrates (>33mg/l), avec un fort risque d'eutrophisation selon l'expert car le rapport N/P est déséquilibré (>480). Cependant le rapport N/P s'est amélioré entre les eaux captées dans le milieu et les eaux stockées justement par l'eutrophisation car les microalgues consomment largement plus d'azote que de phosphore. L'auteur précise que la qualité de la ressource, au niveau des eaux pompées peut potentiellement varier plus fortement en milieu karstifié.

Il précise que l'eau de ces retenues est verte, avec une odeur de géosmine qui traduit une eau eutrophe, avec une teneur en cyanobactéries très élevées, supérieur à 160.000 cellules par ml à Oulmes Nord, ce qui est supérieur au seuil d'alerte de l'OMS pour des eaux de consommation, mais il précise que la teneur en microcystines (cyanotoxines¹⁶) est inférieure au seuil de quantification.

Deux autres phénomènes sont également observés, l'entartrage qui est provoqué par le dépôt d'ions carbonate (de tartre) dans les canalisations et sur le fond de la membrane et la formation de Biofilm favorisée par la rugosité créée par le tartre (CONSULT'EAU, 2018). La technique que recommande

¹⁶Toxines aux effets neurotoxiques, hépatotoxiques ou dermato-toxiques produites par des cyanobactéries (ANESES, 2012).

l'expert, et qu'un irriguant utilise déjà, est l'utilisation régulière de biocide non rémanents comme le peroxyde d'hydrogène, en rappelant que son efficacité décroît avec la teneur en matière organique et que sont coûts soit élevé. Le plus efficace restant de traiter la source du problème en contrôlant les proliférations algales au sein des réserves.

Il souligne que le traitement des proliférations algales est complexe, car les traitements algicides sont basés sur des biocides rémanents et toxiques pour les végétaux, que les volumes à traiter sont considérables et que la réglementation sur les biocides est assez stricte. La plupart des solutions envisagées comme l'insufflation d'air, l'introduction de carpes, ou des systèmes à ultrasons ne sont pas recommandées par l'expert car elles risquent d'aggraver plus la situation que de la résoudre selon lui. Seules des options de couverture flottantes semblent envisageables comme des « shades balls », dalles PVC, liner et panneau solaire, mais présentent néanmoins une série d'inconvénients, elles peuvent notamment servir de support à la formation de bactéries, annuler l'effets des UV germinicides naturels, où même augmenter la persistance des toxines produites par les cyanobactéries comme les micro-cystines (Sivonen & Jones 1999 in CONSULT'EAU, 2018).

L'auteur fait mention de plusieurs études (Chorus et Bartram 1999, Corbel et al 2014) qui ont démontré une possible bioaccumulation des cyanotoxines dans les plantes cultivées, l'irrigation avec de l'eau contenant des cyanobactéries peut donc devenir une source de contamination pour les humains à travers la consommation des produits cultivés, et ce, sans contact direct avec les eaux (CONSULT'EAU, 2018).

L'auteur précise également que en cas de contamination, l'action d'un biocide non rémanent peut abattre la concentration des germes mais pas celle des toxines, il faudrait mettre en œuvre une oxydation puissante comme une ozonation et une filtration sur charbon actif, ainsi qu'une floculation/décantation pour séparer les matières en suspensions et matières organiques.

Enfin, l'auteur préconise de renforcer la surveillance des ressources et des retenues, avec par exemple la mise en place d'une analyse avant chaque saison d'irrigation et à la mi-saison des germes problématiques et des cyanotoxines, mais aussi de mettre en œuvre un protocole d'intervention en cas d'incidents, de nettoyer les matériels et canalisations 2 fois par ans, et de couvrir les retenues pour limiter l'évaporation et conserver la qualité d'eau souterraines aux eaux stockées

7.4. Dynamiques des blooms algaux

Pour illustrer la dynamique des blooms algaux au sein des réserves de substitutions sans avoir accès à une chroniques de données mesurées in-situ, nous pouvons utiliser les images Sentinel-2 L2A. Sentinel 2 est équipé de capteur multispectral et fournit des images tous les 5 jours. Un code a été développé dans le cadre du projet PRIMA MAGO par CETAQUA, afin d'estimer des paramètres de qualité de l'eau à partir de l'absorption et la réflexion de la lumière solaire par les composants de l'eau, selon les différentes bandes spectrales obtenue par données satellites. A titre d'exemple : la bande spectrale rouge (640-670 nm) est absorbée par le pigment d'algue chlorophylle-a, tandis que la bande verte (530-590 nm) est reflétée¹⁷.

¹⁷"MAGO-Water-Quality-Monitoring-Tool" GITHUB, <https://github.com/cetaqua/MAGO/tree/main/MAGO-Water-Quality-Monitoring-Tool>, (consulté le 02/06/23).

Tableau 14: Paramètre de qualité de l'eau mesuré, formules mobilisant les différentes bandes spectrales et résultats statistiques des validations (Source : Outil de surveillance de la qualité de l'eau MAGO, code ouvert pour le Sentinel EO Browser, développé dans le cadre du projet PRIMA MAGO).

ID Number	Parameter measured	Formula	Parameter range	Application	Number of samples for validation	R ²	Reference
1	Chlorophyll a for high values > 5 mg / m ³ (Soria-Perpinyà 2021)	$19.866 \times (B05/B04)^{2.3051}$	5.16 – 674.70 mg m ⁻³	Mediterranean reservoirs and lakes	144	0.90	Soria-Perpinyà et al. 2021
4	Cyanobacteria (Phycocyanin) mg/m ³ (Soria-Perpinyà 2021)	$21.554 \times (B05/B04)^{3.4791}$	0.13 – 1040 mg m ³	Mediterranean reservoirs and lakes	138	0.79	Soria-Perpinyà et al. 2021

Nous avons récupéré la formule 1 pour les concentrations élevées en chlorophylle-a et la formule 4 pour les concentrations en cyanobactérie toutes deux développées par Soria-Perpinyà et al., (2021). Ces formules ont été développée pour une application aux masses d'eau intérieures de la zone méditerranéenne, et ont été calibrées et validées avec des mesures de réflectance in-situ. Les concentrations en cyanobactéries sont déduites à partir des mêmes bandes de réflectance que la chlorophylle-a.

Nous avons appliqué les codes sur différentes images de Landsat 2 pour des jours ne présentant pas de nébulosité sur le secteur, de juin à septembre 2022 et en août de 2018 à 2022, en réalisant un focus sur les réserves d'Oulmes Sud et Nord.



Figure 68: Evolution de la concentration en chlorophylle-a sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord de juin à septembre 2022 à partir des images Sentinel 2 (Données : Sentinel-2 L2A, Sentinel Hub, code développé par CETAQUA dans le cadre du projet PRIMA MAGO)



Figure 69: Concentration cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord en août de 2017 à 2020 à partir des images Sentinel 2 (Données : Sentinel-2 L2A, Sentinel Hub, code développé par CETAQUA dans le cadre du projet PRIMA MAGO).

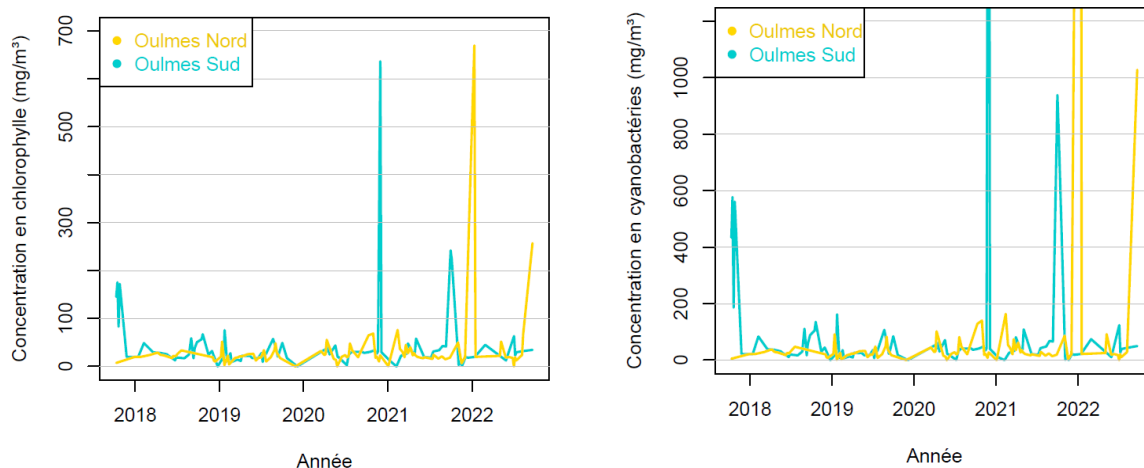


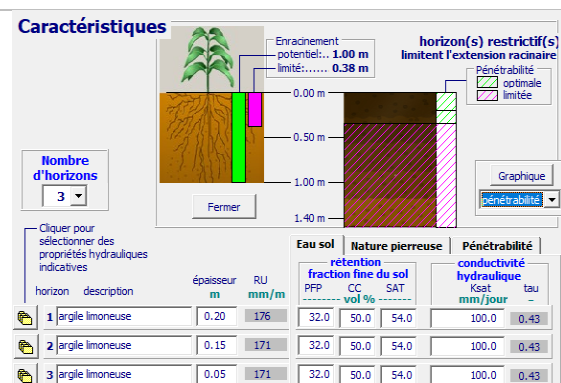
Figure 70: Evolution des concentrations en chlorophylle-a et cyanobactérie sur les 50 premiers cm des réserves d'Oulmes Sud et Nord entre 2018 et 2022 à partir des images Sentinel 2 (Données : Sentinel-2 L2A, Sentinel Hub, code développé par CETAQUA dans le cadre du projet PRIMA MAGO).

En octobre 2018, le bureau d'étude CONSULT'EAU mesurait entre 7 et 10 $\mu\text{g/l}$ (soit entre 7 et 10 mg/m^3) de chlorophylle-a au sein de la réserve d'Oulmes Nord, les concentrations obtenues par données satellites se situent, elles, plutôt autour de 30 $\mu\text{g/l}$.

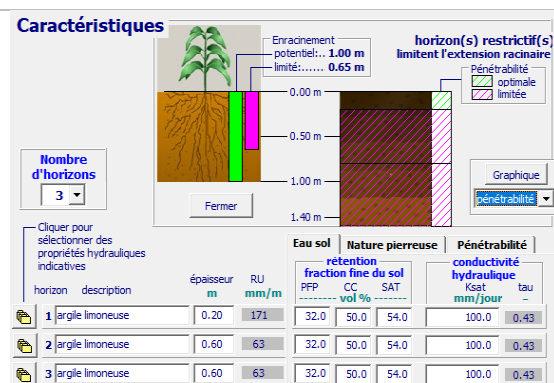
On observe une dynamique annuelle, avec des pics qui se situent globalement plutôt vers le début d'automne, ce qui correspond au période où l'on retrouve les plus faibles volumes au sein des réserves, à la fin de la période d'irrigation et avant la période de remplissage.

8. Description détaillée des profils de sols utilisés dans AquaCrop

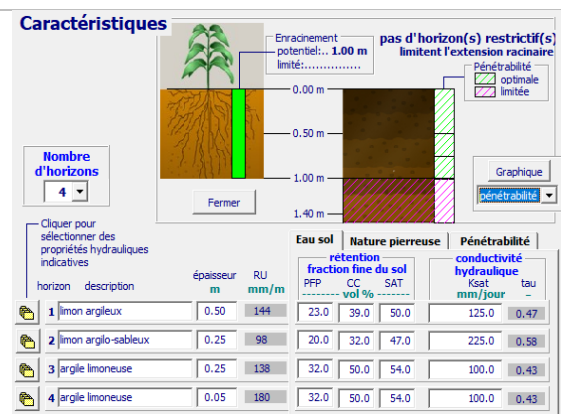
Petites Groies :



Grosses Groies :



Limons :



Marais desséché :

