

Rapport d'étude

Analyse du lien entre l'impact du climat et les pratiques agricoles sur les concentrations en nitrates dans les masses d'eau du Charolais.



G2 Master Sol, Eau, Milieux, Environnement

Chargés de projet : J. DEHER

Chargés d'étude : C. OLHAITZ, H. MINCHIN, Z. BRIDANT, J. REGIMBEAU, Y. THIOYE

Référent : P. AMIOTTE-SUCHET

18 décembre 2021

Table des matières

Avant-propos	4
Introduction	5
Partie 1 : Littérature scientifique	6
1. Le cycle de l'Azote dans l'environnement	6
2. Réglementations et Normes Environnementales	7
3. Paramètres influençant les transferts et la mobilité des nitrates	10
Partie 2 : Cartographie des paramètres impactant les nitrates dans le Charolais-Brionnais	12
1. Caractérisation de la zone d'étude	12
2. Modèle de contamination	14
3. Paramètres liés aux pressions	15
3.1. Effectifs des cheptels	15
3.2. Occupation du sol	18
4. Paramètres de transferts et transformations	19
4.1. Géologie	19
4.2. Pédologie	21
4.3. Épaisseur des sols	22
4.4. Réserve utile	23
4.5. Topographie	25
5. Qualité des eaux de surfaces par bassins versants	29
Partie 3 : Variabilité temporelle des concentrations et des flux de nitrates dans les masses d'eau superficielles	33
1. Contexte et méthode	33
2. Résultats	34
3. Limites	46
4. Cas particulier de Vendennesse sur Arroux	46
5. Pistes d'expérimentation	47
Conclusion	49
Bibliographie	50
Annexes	54

Table des figures

Figure 1 : Cycle de l'azote. Source : UNIFA.....	6
Figure 2 : Le cycle de l'eau dans les sols	11
Figure 3 : Carte des petites régions agricoles (PRA) du département de Saône-et-Loire. Source : Préfet de Saône-et-Loire.....	13
Figure 4 : Schéma présentant la structure géologique simplifiée du Brionnais, Source: Frédéric Gaudry, 2012, ENS-Lyon.....	13
Figure 5 : Modèle sous forme d'arbre permettant d'évaluer les paramètres pouvant être responsable de contamination des masses d'eaux superficielles en nitrates.	14
Figure 6 : Cartes représentant les effectifs des vaches allaitantes (A), vaches laitières (B), ovins (C), et caprins (D) par communes en 2019 dans le département Saône-et-Loire. Source : E. Perradin, Conseiller en culture, Chambre d'Agriculture Saône-et-Loire, Communication orale et écrite, 2021	17
Figure 7 : Carte de l'occupation des sols de la zone d'étude du Charolais-Brionnais. (D'après le CLC de 2006)..	18
Figure 8 : Carte de la surface en prairies dans la Surface Agricole Utile par commune en 2020 (E.Perradin, Conseiller en culture, Chambre d'Agriculture Saône et Loire, Communication orale et écrite, 2021)	19
Figure 9 : Carte des grandes familles géologiques simplifiées avec le réseau de failles du Charolais-Brionnais au 1/50 000 (D'après les données géologiques d'InfoTerre du BRMG)	20
Figure 10 (A) et (B): Graphiques circulaires représentant les % surfaciques des substrats géologiques sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, par rapport à la carte géologique simplifiée (Figure 9)	20
Figure 11 : Carte des grandes familles de sols simplifiées Charolais-Brionnais au 1/250 000 (D'après les bases de données et les fichiers shapefile du Référentiel Régional Pédologique de Saône-et-Loire (RRP71) de 2005 fournies par AgroSup & l'INRAe, et du Référentiel Régional Pédologique de l'Allier (RRP03) de 2012 fournies par VetAgro Sup.....	21
Figure 12 : Graphiques circulaires représentant les % surfaciques des Unités Cartographiques de Sol (UCS) sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, par rapport à la carte pédologique simplifiée (Figure 11)	22
Figure 13 : Carte des épaisseurs de sols en cm du Charolais-Brionnais associées aux UCS (Unités Cartographiques de Sols).....	23
Figure 14 : Histogrammes représentant la répartition des effectifs de profondeurs de sols sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, relatifs à la carte des épaisseurs de sol (Figure 13)	23
Figure 15 : Carte des réserves utiles en mm par UCS du pays Charolais-Brionnais	24
Figure 16 : Histogrammes représentant la répartition des réserves utiles sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, relatifs à la carte des réserves utiles en mm (Figure 15)	24
Figure 17 : Carte des courbes de niveaux à intervalles de 50 m du Charolais-Brionnais	25
Figure 18 : Carte des pourcentages de pente du Charolais-Brionnais	26
Figure 19 : Cartes des concentrations maximales en nitrate interpolées aux bassins versant correspondants pour les années 2018 (A), 2019 (B), 2020 (C). Concernant la station de Maltat, son bassin versant a été représenté en hachure car il se superpose avec le bassin de la station de Cressy.	30
Figure 20 : Carte de l'occupation du sol en fonction des bassins versants correspondants	31
Figure 21 : Carte de localisation des huit stations de suivi de la qualité de l'eau dans la région Charolais-Brionnais.....	33
Figure 22 : Variation des concentrations en nitrates sur 8 stations du Charolais-Brionnais, séparée en année civile. Source : Naiades	34
Figure 23 : Représentation des cycles hydrologiques par le débit mesuré sur la station de Rigny-sur-Arroux dans la période 2010/2011.	35
Figure 24 : Débits des rivières et sécheresses par grand bassin de la région depuis 2012. Source : "Rapport Gestion quantitative de la ressource en eau en Bourgogne Franche-Comté" - ARS Bourgogne Franche-Comté. 36	
Figure 25 : Histogrammes comparatifs entre flux en kg/km ² /j (bleu) et concentration en mg/L (orange) des valeurs uniques mensuelles de nitrates mesurés sur les stations de Vitry-en-Charollais sur la Bourbince (A),	

<i>Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux (B) et Poisson sur l'Arconce (C) de l'année 2018 - (*) = Mois sans données. Sources : Banque Naiades et Hydro France</i>	38
<i>Figure 26 : Histogrammes comparatifs entre flux en kg/km²/j (bleu) et concentration en mg/L (orange) des valeurs uniques mensuelles de nitrates mesurés sur les stations de Vitry-en-Charollais sur la Bourbince (A), Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux (B) et Poisson sur l'Arconce (C) de l'année 2019 - (*) = Mois sans données. Sources : Banque Naiades et Hydro France</i>	40
<i>Figure 27 : Histogrammes comparatifs entre flux en kg/km²/j (bleu) et concentration en mg/L (orange) des valeurs uniques mensuelles de nitrates mesurés sur les stations de Vitry-en-Charollais sur la Bourbince (A), Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux (B) et Poisson sur l'Arconce (C) de l'année 2020 - (*) = Mois sans données. Sources : Banque Naiades et Hydro France</i>	41
<i>Figure 28 : Graphiques de comparaison entre le débit et le flux de nitrates sur les trois stations Vitry-en-Charollais (A), Rigny-sur-Arroux (B) et Poisson (C), séparée en année civile. Sources : Banque Naiades et Hydro France</i>	44
<i>Figure 29 : Variation du flux de nitrates en fonction du débit et la date de prélèvement sur la station de Rigny-sur-Arroux. Sources : Banque Naiades et Hydro France</i>	45

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Règles d'affiliation RSD ou ICPE selon différentes espèces. Source : Carine PASSELANDE-CATALA, 2018, Chambre d'agriculture de la Vienne.</i>	8
<i>Tableau 2 : Coefficients UGB utilisés pour différents types d'animaux des troupeaux bovins, ovins et caprins en France (Source: Benoit et Veysset, 2021).....</i>	17
<i>Tableau 3 : Tableau récapitulatif des observations sur les paramètres du modèle de contamination sur la zone d'étude en comparaison avec la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates</i>	27
<i>Tableau 4 : Tableau de l'occupation du sol par bassins versants</i>	32

Avant-propos

Dans un contexte de changement climatique et d'évolution des pratiques agricoles, la Directive Nitrates évolue sur le territoire Français avec la mise en place de zones vulnérables, qui sont des secteurs où la pollution en nitrates est susceptible d'être une menace à court et long terme sur l'environnement. De nouveaux objectifs et une démarche territoriale ont été lancés. La DREAL a été mandatée dans le cadre de la nouvelle révision de classement en zone vulnérable de 2021, afin de pousser les recherches quant aux origines possibles des forts taux en nitrates dans le Charolais-Brionnais. En effet, la zone regroupant quasiment exclusivement des élevages bovins extensifs, le cahier des charges imposé par un classement en zone vulnérable n'aurait pas pu améliorer les pratiques et de ce fait faire baisser les taux de nitrates. C'est pourquoi en février 2021, la DREAL a réalisé une étude détaillée sur l'évolution des concentrations en nitrates de 8 masses d'eau de la zone d'étude, permettant de mettre en évidence les variations de concentrations liées au climat.

Introduction

La protection de l'environnement est un enjeu majeur dans la société actuelle. En février 2021 la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) a réalisé une étude : "Analyse et synthèse des données physico-chimiques, hydrométriques et biologiques sur 8 stations DCE du Charolais" dont le but était de comprendre à travers des données environnementales et climatiques, corrélées avec l'évolution de l'activité agricole, les origines de la pollution par les nitrates et l'évolution des concentrations constatées. Elle souhaite aujourd'hui approfondir ses connaissances sur ce sujet.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude a été de déterminer les origines de la forte concentration en nitrates dans les eaux superficielles sur la zone d'étude du Charolais-Brionnais, en lien avec le changement climatique dans un contexte d'élevage bovin extensif.

Pour cela, les différents paramètres environnementaux pouvant avoir un impact sur la variabilité de concentration en nitrates ont été étudiés à travers des outils cartographiques. Un intérêt particulier a été porté sur les paysages de la zone d'étude au travers de l'occupation des sols, la topographie, les différents cheptels présents, puis sur la diversité et les caractéristiques des sols de la zone.

De plus, le rapport précédemment réalisé par la DREAL en février 2021 a été complété, en alimentant les données sur les 8 bassins versants de la zone d'étude. Pour cela, l'étude a été faite de manière qualitative et quantitative sur les eaux de surfaces, à l'aide de données hydrochimiques mises en corrélation avec l'influence du changement climatique, afin de caractériser la qualité de l'eau.

Pour clore ce rapport, plusieurs pistes d'expérimentations ont été apportées, sur ce qui serait intéressant d'effectuer dans les prochaines études pour mieux comprendre et limiter l'évolution des pollutions en nitrates sur la zone du Charolais-Brionnais.

Partie 1 : Littérature scientifique

1. Le cycle de l'Azote dans l'environnement

La composition de l'air est de 21 % d'oxygène, 1 % d'argon et environ 78% d'azote. La plupart de ces éléments sont utilisés par les organismes vivants sur la Terre, notamment l'oxygène et l'azote. Le cycle biogéochimique de l'azote (Figure 1) est complexe en raison de l'activité des microorganismes. Dans l'environnement le cycle se compose d'une succession d'étapes où les différentes formes d'azote, l'azote organique du sol notamment, se transforment pour former l'azote minéral présent dans les agrosystèmes. Les différentes étapes du cycle sont les suivantes :

Pour la fixation de l'azote atmosphérique, la végétation s'associe aux nodules présents sur les racines afin de fixer l'azote atmosphérique pour que ce dernier puisse être utilisé par les plantes. La fixation de l'azote réalisé par les légumineuses est la plus importante. Au niveau mondial, les cultures de soja et l'ensemble des légumineuses entraînent la fixation de 25% de l'azote présent dans les engrais. Par la suite, l'organisation microbienne transforme l'azote minéral en azote organique. Ce dernier n'est pas directement assimilable par les plantes, il doit être minéralisé. La *minéralisation* de la matière organique du sol est un processus important qui permet la création de l'ammonium (NH_4^+). S'ensuit la *nitrification* réalisée par les bactéries du sol. L'ammonium oxydé forme des nitrites (processus de nitritation), puis les nitrites sont oxydés à leur tour, formant les nitrates (processus de nitratation).

Les nitrates formés peuvent être *lixiviés*, c'est-à-dire entraînés par les eaux vers la profondeur. Ce phénomène s'accroît en hiver par la présence d'excès d'eau induisant la migration des nitrates hors de portées des racines.

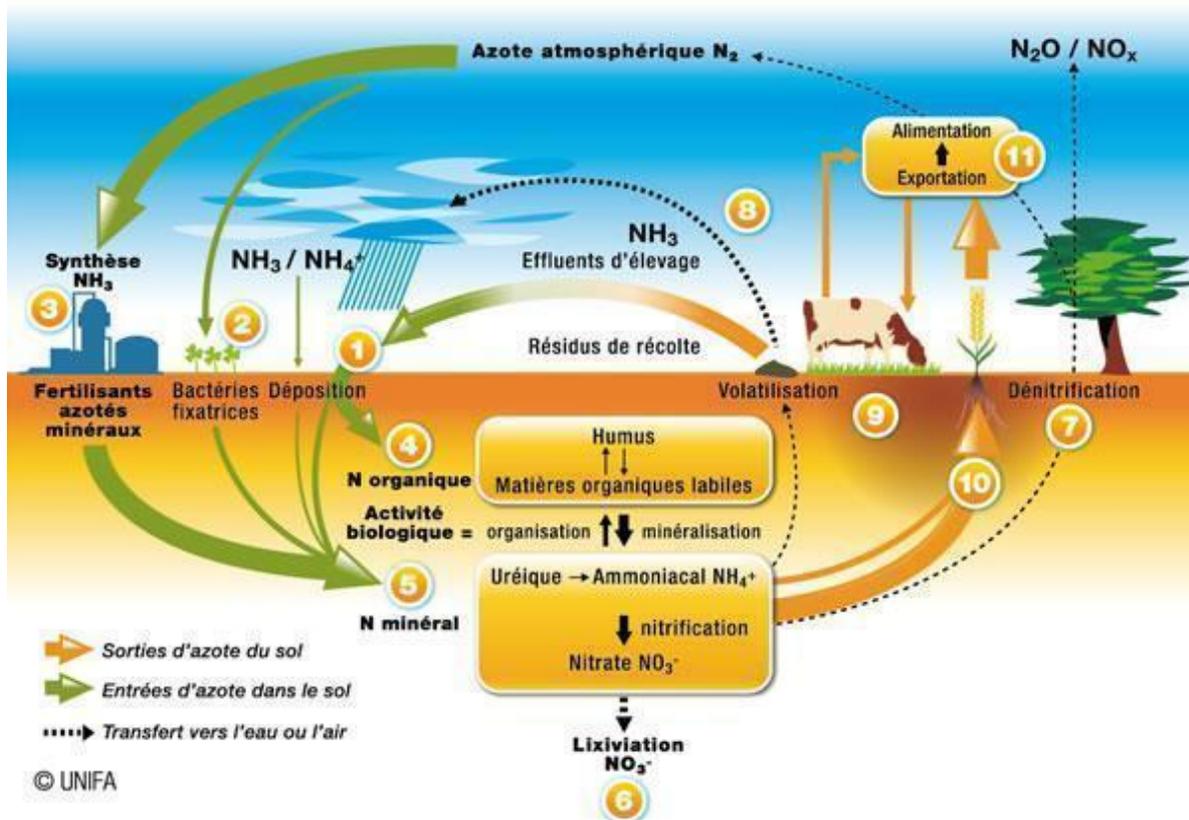


Figure 1 : Cycle de l'azote. Source : UNIFA

À la suite d'événements pluvieux intenses favorisant la lixiviation mais également la saturation en eau du sol, il peut se produire la *dénitrification*. Ce processus a lieu lorsque les microorganismes sont dépourvus d'oxygène. Ainsi, les bactéries du sol vont transformer les nitrates et nitrites en diazote mais aussi en protoxyde d'azote, qui est un gaz à effet de serre avec un pouvoir réchauffant 310 fois supérieur à celui du CO₂.

A cela s'ajoutent les rejets atmosphériques, dus aux activités anthropiques (incendie...), source de perturbation du cycle de l'azote. D'après les recherches de James N. Galloway, la production mondiale d'azote entre 1600 et 1990, due aux apports anthropiques, aurait augmentée de 50%. La concentration en N₂O atmosphérique augmente annuellement. Actuellement ce taux dans l'atmosphère est de 318.6 ppb (partie par millions), avec une hausse de 18% par rapport à celle calculée pendant l'ère préindustrielle (INRA, 2003). Ce gaz est préoccupant par rapport à son pouvoir réchauffant (Pellerin, 2013). Les activités humaines, comme les industries, les combustibles fossiles et l'agriculture, peuvent donc avoir des incidences sur le cycle de l'azote, en augmentant la quantité d'azote présent dans le cycle.

Les engrais utilisés en agriculture prennent des formes diverses (engrais minéraux de synthèse, effluents d'élevage, effluents d'industries agro-alimentaires, boues de station d'épuration...). En fonction de leur nature, ces engrais peuvent être composés d'azote minéral uniquement, ou également contenir de l'azote organique nécessitant une transformation en azote minéral pour être assimilable par les plantes. Cependant, en vue de la croissance démographique et afin de répondre aux besoins humains, la quantité d'azote fixée industriellement pour synthétiser des engrais double tous les 6 ans (INRAE- 2016). En conséquence, la quantité de nitrates entraînée vers les nappes d'eau souterraines augmente chaque année.

Le cycle biogéochimique de l'azote est influencé par des facteurs anthropiques. Les concentrations en nitrates dans l'environnement augmentent, dues à l'intensification de l'agriculture induisant une pollution du milieu aquatique. Cela peut provoquer l'eutrophisation des masses d'eau, ayant un impact sur la faune et de la flore, ainsi que sur la potabilité de l'eau. Ainsi, il est nécessaire de mettre en place des actions à l'échelle nationale et internationale.

2. Réglementations et Normes Environnementales

La pollution en nitrates est donc une réelle problématique environnementale qui conduit à la mise en place de nombreuses réglementations. Parmi celles-ci, la Directive Nitrates créée le 12 décembre 1991, visant à protéger la qualité des eaux. Les deux objectifs de cette Directive sont de réduire la pollution des eaux par les nitrates et l'eutrophisation issue des activités agricoles, ainsi que de prévenir l'extension de ces pollutions (Commission européenne, 2020).

Les nitrates sont des facteurs de dégradation des milieux aquatiques. Ainsi, La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) a été instaurée suite à de fortes concentrations en nitrates, avec comme objectif principal la préservation de la qualité des milieux aquatiques. Cette directive a été établie par l'Union européenne et adoptée le 23 octobre 2000 (Commission Européenne, 2020).

De plus, pour sectoriser les zones présentant une plus forte concentration en nitrates dans les milieux aquatiques. Une répartition en "Zone vulnérable" par la Directive Nitrates fixée par l'article R211-76 du code de l'environnement (Laval et al., 2018) et établie d'après les critères suivants :

- « •Sont définies comme atteintes par la pollution, et donc à intégrer en zone vulnérable :
- a) Les eaux souterraines et les eaux douces superficielles, notamment celles servant au captage d'eau destinée à la consommation humaine, dont la teneur en nitrate est supérieure à 50 milligrammes par litre ;
 - b) Les eaux des estuaires, les eaux côtières et marines et les eaux douces superficielles qui ont subi une eutrophisation susceptible d'être combattue de manière efficace par une réduction des apports en azote.
- Sont définies comme menacées par la pollution, et donc à intégrer en zone vulnérable :
- a) Les eaux souterraines et les eaux douces superficielles, notamment celles servant au captage d'eau destinée à la consommation humaine, dont la teneur en nitrate est comprise entre 40 et 50 milligrammes par litre et montre une tendance à la hausse ;
 - b) Les eaux des estuaires, les eaux côtières et marines et les eaux douces superficielles dont les principales caractéristiques montrent une tendance à une eutrophisation susceptible d'être combattue de manière efficace par une réduction des apports en azote. »

Ainsi, pour limiter les transferts de la pollution en nitrates vers les ressources en eau, certains puits de captage sont surveillés et protégés au titre de Captage Grenelle. Les Captages Grenelles sont des captages dont l'eau est dans un état dégradé et qui présentent de façon récurrente des non-conformités vis-à-vis des normes de potabilité. Ils correspondent aux 500 captages français jugés ultra-prioritaires parmi les captages déclarés prioritaires dans les SDAGE de bassin hydrographique. Des aires d'alimentation de captages ainsi que la mise en place d'un programme d'actions agricoles ont été réalisés autour de ces captages prioritaires (Seine-Maritime.agriculture.gouv.fr, 2017).

A une échelle plus restreinte, le contrôle des épandages d'intrants organiques est davantage encadré lorsque ces derniers sont réalisés en "Zone Vulnérable". Ainsi, les épandages sont réglementés en fonction du statut de l'exploitation. A partir de leur taille, de leur nature et de leur localisation, elles relèvent soit des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) soit du Règlement Sanitaire Départemental (RSD). Les ICPE font l'objet de plusieurs régimes : déclaration, enregistrement et autorisation.

	RSD	ICPE		
		Déclaration	Enregistrement	Autorisation
Ovin, caprin, équin	Tous			
Vache Laitière (VL)	Moins de 50 VL	De 50 à 150 VL	De 151 à 400 VL	Plus de 400 VL
Vache Allaitante (VA)	Moins de 100 VA	100 VA et plus		
Veau de boucherie et/ou bovin engraissement	Moins de 50 animaux	De 50 à 450 animaux	De 401 à 800 animaux	Plus de 800 animaux

Tableau 1 : Règles d'affiliation RSD ou ICPE selon différentes espèces. Source : Carine PASSELANDE-CATALA, 2018, Chambre d'agriculture de la Vienne.

Les élevages qui relèvent des ICPE doivent tenir un plan d'épandage et le transmettre à la DDPP (Direction Départementale de la Protection des Populations). Les zones épandables et non épandables sont définies par ce plan.

Par ailleurs, les épandages d'intrants au cœur de la zone vulnérable sont réglementés notamment par les mesures du 6^{ème} programme d'Actions Nitrates dans les zones vulnérables de la Bourgogne Franche-Comté :

Selon l'arrêté du 22 novembre 1993 relatif au Code de bonne pratique agricole (legifrance.gouv.fr), les fertilisants sont classés en trois types :

- « Les fertilisants du type I, contenant de l'azote organique et à C/N élevé (supérieur à 8), tels que les déjections avec litière (exemple : fumier) ;
- Les fertilisants du type II, contenant de l'azote organique et à C/N bas (inférieur ou égal à 8), tels que les déjections sans litière (exemple : lisier) et les engrais du commerce d'origine organique animale. Certaines associations de produits comme les déjections associées à des matières carbonées difficilement dégradables (type sciure ou copeaux de bois), malgré un rapport C/N élevé, sont à rattacher au type II ;
- Les fertilisants minéraux et uréiques de synthèse, classés du type III. »

Les périodes d'épandage sont régies par la réglementation. Sur les prairies implantées depuis plus de 6 mois, les fertilisants épandus de type I et II sont interdits à l'épandage de mi-décembre à mi-janvier, et de mi-novembre à fin janvier respectivement.

Ensuite, dans les zones vulnérables, les épandages doivent respecter une distance tampon par rapport aux cours d'eau. Les berges des cours d'eau doivent être pourvues d'une bande enherbée allant de 5 m de large au minimum, jusqu'à 10 m de large maximum. Dans la situation d'une faible pente (jusqu'à 10%), les épandages doivent s'effectuer de 35 m et à 10 m des berges respectivement. Selon la largeur des bandes enherbées minimales et maximales, et lorsque les pentes sont comprises entre 10% et 15%, les distances à respecter sont de 100 m à 10 m respectivement. Lorsque les pentes sont supérieures à 15%, les fertilisants épandus seront uniquement sous forme solide.

Par ailleurs, les conditions d'épandage concernant les sols détremés, inondés, enneigés ou gelés, interdisent cette pratique pour l'ensemble des fertilisants à l'exception de l'épandage d'engrais organiques solides sur sols gelés en surface.

Concernant la gestion des prairies permanentes (de plus de 5 ans) en "Zone Vulnérable", leur retournement pour une mise en culture est interdit dans les périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine. Si une prairie permanente est retournée, elle devra faire l'objet d'une conservation de bandes enherbées en bord de cours d'eau de 10 mètres minimum.

Dans le Charolais-Brionnais, les épandages de fumure sont principalement effectués dans les prairies de fauche et, dans une moindre mesure, sur les prairies de pâturage suite aux récentes sécheresses. Les périodes d'épandage s'étendent de septembre à novembre pour les prairies et à propos des grandes cultures, cette période concerne les mois d'avril et mai. Ces périodes sont régies par la portance et l'occupation des sols, il est nécessaire que les sols soient suffisamment résistants afin de permettre l'entrée des outils agricoles dans les prairies et ainsi effectuer des épandages. L'épandage de fumures organiques dans le Charolais-Brionnais, est compris entre 8 et 12 t/ha et concernant le compost de fumier, la quantité épandue est d'environ 7 à 10 t/ha (E. Perradin, Conseiller en Culture, Chambre d'Agriculture Saône et Loire, Communication orale, 2021).

3. Paramètres influençant les transferts et la mobilité des nitrates

À la suite des observations précédemment citées, à l'importance de ce cycle biogéochimique et aux réglementations mises en place pour limiter la dégradation du milieu, nous pouvons désormais nous intéresser aux paramètres de l'environnement influençant ou non la mobilité des nitrates.

Les nitrates se retrouvent dans divers réservoirs environnementaux : l'atmosphère, les sols, l'hydrosphère. Ainsi, dans le réservoir des sols on constate une saisonnalité pour le cycle de l'azote. En hiver les sols sont nus, l'azote n'est pas minéralisé et donc il n'est pas assimilé par les plantes. La majorité des nitrates sont lessivés, contrairement aux autres saisons (Mantilla-Morales, 1995).

De plus, il est intéressant d'étudier la **forme du paysage**, puisque ce dernier va exercer des influences sur les transferts et les transformations de l'azote en nitrates. En effet, pendant leur transfert vers les cours d'eau, les nitrates vont être influencés par les matériaux rencontrés. Pour modéliser le transfert des nitrates, il est nécessaire d'avoir plusieurs informations telles que l'occupation des sols, la consommation en azote des cultures, le rendement, l'épandage de fertilisants azotés et la capacité de minéralisation des sols. Il est également nécessaire d'obtenir les données historiques de teneur en nitrates dans la nappe (Lemière, 2001).

Quant à la **géologie**, elle peut donner des informations sur la perméabilité du sol ou encore l'éventuelle présence d'un aquifère au sein de certaines formations. Par exemple, les sables, graviers et grès ont tendance à abriter des aquifères homogènes ou continus et à perméabilités d'interstices. Les vitesses d'écoulement sont en général lentes et régulières dans ce type de nappe. Concernant les lithologies calcaires, volcaniques ou granitiques, ce seront cette fois des aquifères hétérogènes ou discontinus qui seront retrouvés (SIGES, Seine-Normandie).

Concernant la pédologie d'un sol, le **type d'humus** (Mull, Mor, Moder) permet de faire une brève estimation de la vitesse de la minéralisation de l'azote des litières annuelles. Elle est rapide dans un Mull alors qu'elle est lente dans un Mor (Bottner et al., 1998).

Concernant le cycle de l'azote en particulier, la **minéralisation** est favorisée par une température supérieure à 7°C, une humidité proche de la capacité au champ (soit 80% à 90% du volume des pores remplis) et un rapport carbone/azote supérieur à 25. La quantité d'azote produite par minéralisation est le facteur majeur qui contrôle la disponibilité en azote des plantes surtout dans des systèmes non-fertilisés (Robertson et al., 1997).

Il existe un lien étroit entre le **lessivage** des nitrates et la charge animale. En effet, si cette dernière augmente, alors les pertes de nitrates par lessivage augmentent. Cependant parfois le lessivage augmente sans corrélation avec la charge animale, l'augmentation est alors due au type de sol, à sa perméabilité et à la dénitrification. Les pertes d'azote par volatilisation sont peu sensibles aux types de sols tandis que la production de biomasse et le niveau global des pertes cumulées augmentent légèrement avec la perméabilité du sol (texture, conductivité et régime hydrique) ainsi qu'avec l'âge de la prairie (Vertes et al., 2007).

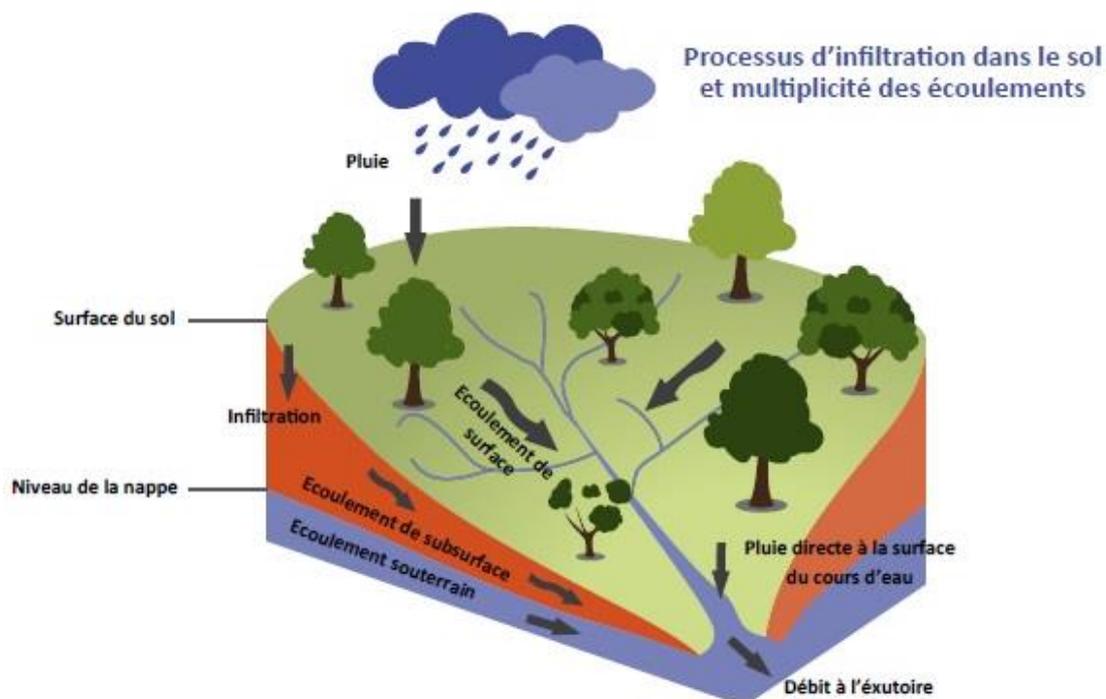
L'**humidité** contenue dans les sols influence la minéralisation de l'azote, puisque les microorganismes sont peu présents en condition de sol sec. De plus, la température, contrôlée par le climat, exerce une influence quant à elle sur la quantité d'azote minéralisée dans le sol (Ellert & Bettany, 1992). L'azote aura tendance à moins se minéraliser dans des conditions climatiques de sécheresse ou de faible présence de matière organique dans le sol. Autre paramètre à prendre en compte, la texture du sol, qui impacte la dimension des pores et de ce fait les quantités d'air et d'eau au sein du sol. Par exemple,

un plus grand taux de minéralisation sera quantifié dans un sol sableux car il aura une capacité d'aération et de réchauffement plus importante. Au contraire, les sols à textures fines se réchaufferont plus lentement au printemps et peuvent également subir des excès d'eau périodiquement dû à un mauvais drainage. Par ailleurs, les taux de carbone et d'azote dans les sols sont corrélés aux teneurs en argile et en limon. Enfin, la structure du sol va également influencer la minéralisation de l'azote organique (Adrien N'Dayegamiye, Université de Laval, 2005).

On observe en théorie des pollutions plus élevées sur les parcelles à **sols peu profonds**. En effet, la faible profondeur entraîne des drainages internes provoquant des fuites de nitrates vers les nappes et ils seront de ce fait plus rapidement inaccessibles pour les végétaux. Sur un hectare, le sol contient de 3 à 10 tonnes d'azote dont 95% se trouvent sous forme organique. La teneur en azote totale des sols, en ses différentes formes, décroît généralement avec la profondeur à l'exception des nitrates, dont on peut trouver des concentrations plus importantes dans les couches plus profondes en raison du lessivage (Mantilla-Morales, 1995).

Il existe 3 modes d'écoulement qui régulent le débit des cours d'eau : écoulement de surface, écoulement hypodermique ou de subsurface et écoulement souterrain ou de profondeur (Figure 2). L'écoulement de surface n'a pas d'impact sur le transfert des nitrates puisque ces molécules sont situées dans la solution du sol. A contrario, l'écoulement hypodermique, se produisant dans la partie non saturée des sols lorsqu'il y a de la pente, est un facteur majeur des apports de nitrates dans les eaux. Cet écoulement est directement connecté à l'évènement pluvieux et entraîne les solutions du sol contenant les nitrates rapidement vers les cours d'eau (soit 24h à 48h).

L'écoulement souterrain correspond à la recharge des nappes et est généré lorsque la réserve utile est saturée. C'est cet écoulement qui transfère les nitrates aux eaux souterraines.



Source image : Cours d'hydrographie générale - Prof. André Musy ; Ecole Polytechnique de Lausanne

Figure 2 : Le cycle de l'eau dans les sols

Concernant l'impact de la taille de la réserve utile sur la quantité de nitrates relargués dans les eaux, il faut être vigilant. En effet, deux cas de figures peuvent se présenter selon les conditions météorologiques de l'année observée (Ubertosi, 2021). Premièrement, si l'on se trouve dans un cas d'hiver très pluvieux, les nitrates contenus dans les sols à petites réserves utiles vont être de nombreuses fois entraînés vers le bas par débordement de la réserve utile, conduisant à un phénomène de dilution des nitrates. A l'inverse, les sols épais à grande réserve utile auront eu une saturation en eau plus tardive et n'auront pas eu l'occasion de se décharger plusieurs fois de leurs nitrates, provoquant de ce fait de forts pics en nitrates au moment de la saturation du sol. Dans le deuxième cas de figure, lors d'hivers très secs, ce sera le phénomène inverse qui aura lieu. Les sols à grande réserve utile ne seront pas arrivés à saturation et ne participeront pas à la recharge de la nappe. En revanche, les petites réserves utiles seront saturées plus rapidement sans qu'il n'y ait assez de précipitations pour assurer le phénomène de dilution cité précédemment. Il est donc indispensable de corrélérer les conditions météorologiques de l'année observée avec les réserves utiles et épaisseurs des sols pour pouvoir définir si un sol est susceptible à relarguer plus ou moins de nitrates dans les eaux.

Il y a un impact important de la réserve en eau dans le sol sur le **rendement agricole**. En effet, si la réserve en eau est insuffisante, le rendement sera inférieur, et la quantité prévue d'épandage par l'agriculteur sera faussée entraînant un apport d'azote trop important par rapport à ce qui peut être assimilé par les plantes (Trouche & Morlon, 1999).

Toujours sur les interactions plantes/eau, l'apparition d'un stress hydrique peut amener une diminution de l'assimilation de l'azote par les plantes (Kaiser & Förster, 1989). Un stress hydrique peut également être provoqué par un stress azoté qui va limiter la croissance racinaire (Barraclough et al., 1989).

Dans la zone d'étude du Charolais-Brionnais, sur laquelle se trouve une zone classée "vulnérable", nous chercherons à expliquer pourquoi les concentrations en nitrates sont élevées sur cette zone, alors que les pratiques agricoles tendent à limiter les apports d'azote. Est-ce que les caractéristiques de la zone d'étude (géomorphologiques, écoulements de surface, de subsurface et de profondeur, climatiques...) peuvent avoir une influence sur les concentrations en nitrates dans l'environnement, et plus particulièrement sur les masses d'eau superficielles ? Quelles solutions pouvons-nous mettre en place pour limiter la mobilité de la pollution et l'atteinte environnementale engendrée sur cette zone d'étude ?

Partie 2 : Cartographie des paramètres impactant les nitrates dans le Charolais-Brionnais

1. Caractérisation de la zone d'étude

La zone d'étude est le périmètre du pays Charolais-Brionnais. Elle se situe sur le département de la Saône-et-Loire, avec une superficie de 2500 km². Le territoire est principalement rural et est composé de trois Petites Régions Agricoles (PRA) : la Sologne-Bourbonnais, le Charolais et le Brionnais (Figure 3). La zone d'étude a pour particularité de présenter une grande variété de paysages issus de différentes formations géologiques. Le climat est tempéré et chaud. La pluviométrie est répartie au long de l'année, entraînant une pousse continue de l'herbe qui alimente les bovins en extérieur pendant presque huit mois sur une année, et permet de faire des réserves de foin pour l'hiver. La température moyenne est de 10,8°C. De plus, une zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates a été définie se situant sur le bassin alluvial de la Loire, au sud-ouest du département de la Saône-et-Loire.

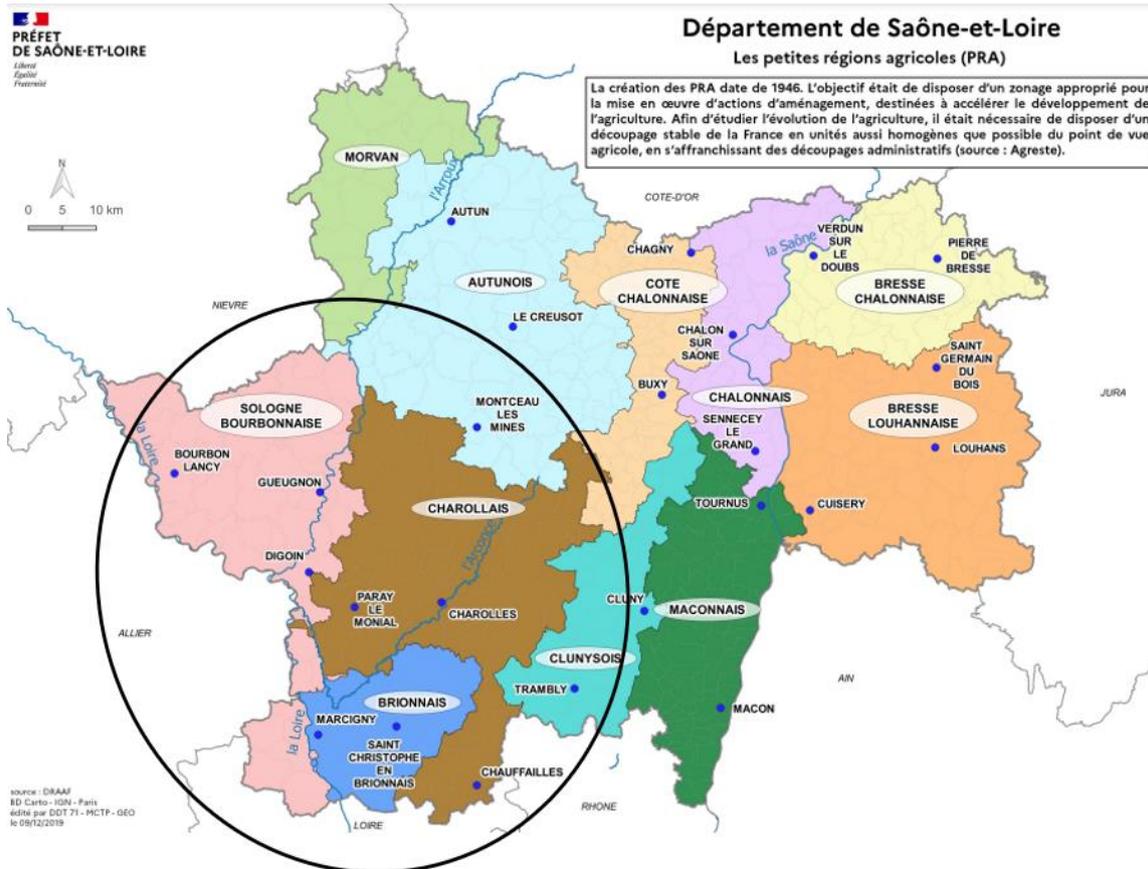


Figure 3 : Carte des petites régions agricoles (PRA) du département de Saône-et-Loire. Source : Préfet de Saône-et-Loire

L'ensemble des formations géologiques ainsi que des paysages sont principalement issus de la surrection des Alpes lors de l'ère tertiaire. Il résulte de cette tectonique dite "en touche de piano", d'orientation Sud-Ouest à Nord-Est, la formation de la plupart des Monts du Charolais, du Mâconnais, des collines ainsi que l'affaissement (demi-graben) de la Loire (Figure 4). Cette tectonique particulière en bandes globalement parallèles, est à l'origine du basculement de quatre blocs structurant le Brionnais et lui conférant des caractéristiques particulières au niveau de ses sols (Charlot & Virely, 2019).

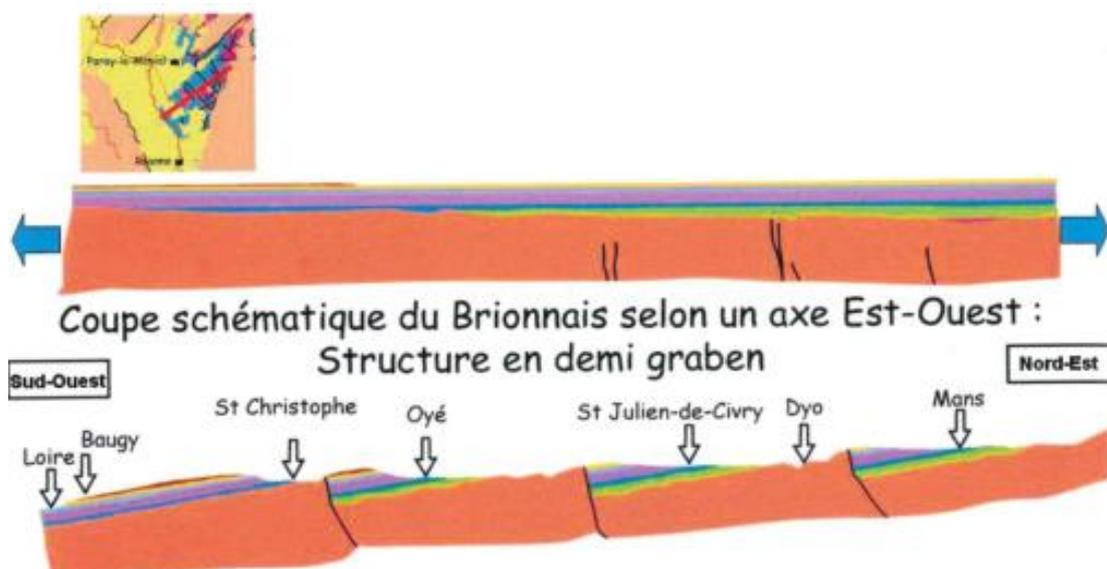


Figure 4 : Schéma présentant la structure géologique simplifiée du Brionnais, Source : Frédéric Gaudry, 2012, ENS-Lyon.

2. Modèle de contamination

Comme cité précédemment, le pays Charolais-Brionnais a eu sa partie ouest classée en “Zone Vulnérable” par la Directive Nitrates et a été de nouveau désigné dans la révision des zones classées en 2021. La pollution en nitrates étant le plus souvent assimilée comme résultant des pratiques agricoles (Commission européenne, 2020), la question d’une origine différente a été soulevée étant donné que le pays Charolais-Brionnais est exclusivement occupé par de l’élevage bovin extensif utilisant très peu voire pas d’intrants azotés. L’impact du changement climatique a été une des mises en cause dans le dépassement des seuils de nitrates dans le dernier rapport de la DREAL datant de février 2021, notamment sur les durées importantes des sécheresses estivales en 2018 et 2019.

Couplé à cela, certaines zones du pays Charolais-Brionnais pourraient être plus ou moins sensibles à la pollution en nitrates selon leurs caractéristiques. Pour étudier cela, un modèle de facteurs a été créé (Figure 5), se basant sur des variables utilisées dans des modèles déjà existants tels que AZOTOPIXAL (Macary et al., 2006), DRASTIC, GOD, ou encore SI (Ewodo Mboudou et al., 2016), qui établissent des risques de contamination des masses d’eau souterraines. Ces méthodes se présentent sous forme de système de notation numérique basées sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Chaque paramètre est subdivisé en intervalle de valeurs significatives. Dans le cas de cette étude sur le pays Charolais-Brionnais, seules les masses d’eau superficielles sont étudiées, c’est pour cela qu’un modèle plus adapté que les précédents a été mis au point. Il rassemble différents paramètres tels que les pratiques culturales, la pédologie, la géologie, les données climatiques et hydrochimiques, l’occupation du sol, la topographie ou encore l’hydrographie. L’étude de ces différents paramètres amènera à regarder leur distribution spatiale par cartographie, afin d’identifier qualitativement les zones les plus à risques du pays Charolais-Brionnais face à la contamination en nitrates des masses d’eau superficielles.

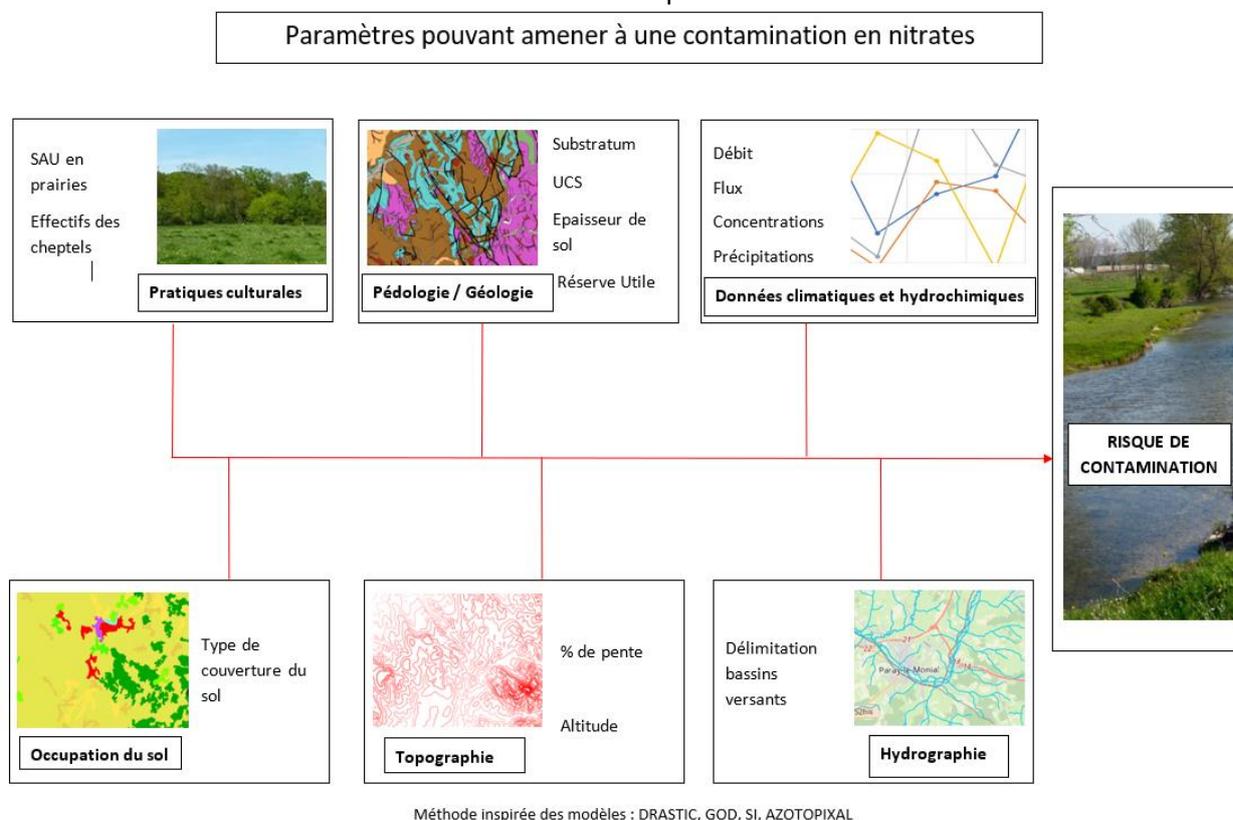


Figure 5 : Modèle sous forme d’arbre permettant d’évaluer les paramètres pouvant être responsable de contamination des masses d’eau superficielles en nitrates.

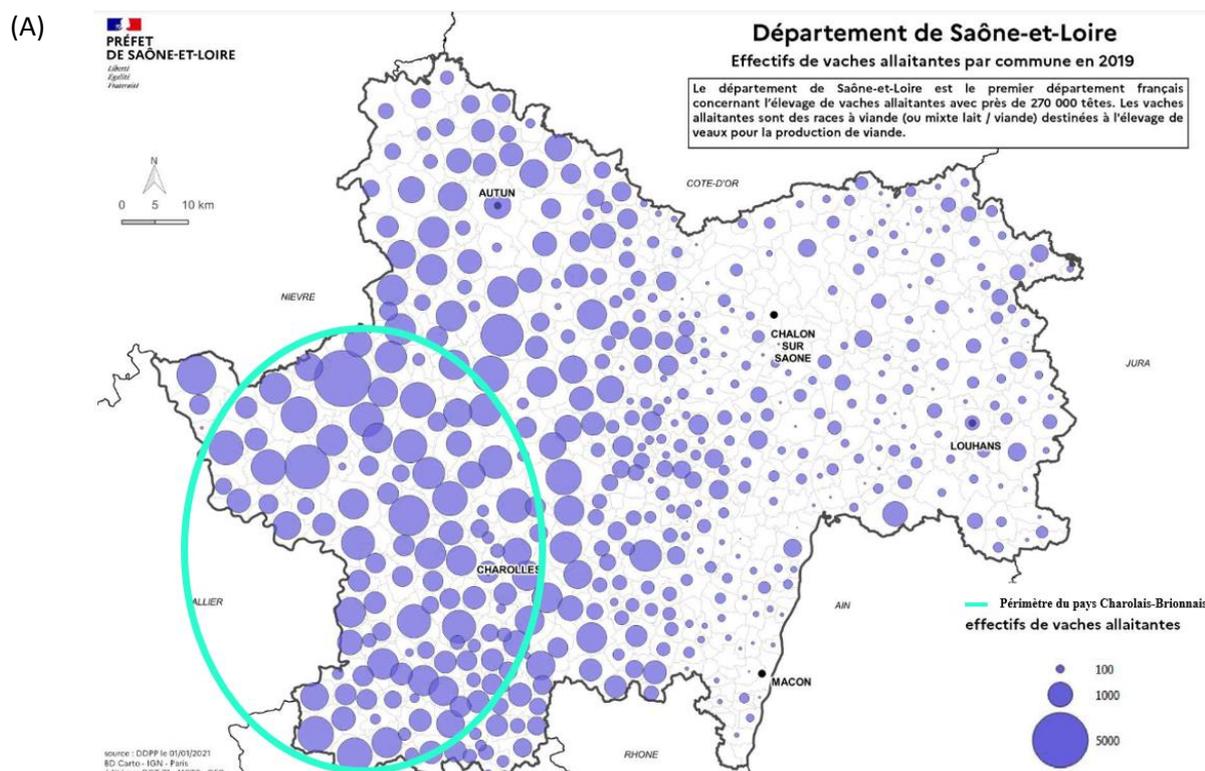
Ce modèle regroupe des paramètres influençant l'origine, la transformation et le transfert des nitrates, provenant de sources externes et circulant au travers des sols avant d'atteindre ensuite les masses d'eau de surface. Les paramètres liés aux pressions sont les pratiques culturales (part de SAU en prairies et effectifs des différents cheptels par communes), elles-mêmes corrélées à l'occupation du sol. Les paramètres allant jouer sur les transferts et la quantité mobile des nitrates sont la nature des sols (de surface et substratums), leur profondeur et leur réserve utile, la topographie de la zone (altitude et pente), l'occupation du sol et les conditions climatiques. Pour terminer, on retrouve les paramètres de qualité des milieux avec les données hydrochimiques de qualité des masses d'eaux superficielles réceptionnant les nitrates après leur transfert dans les sols.

Pour chaque paramètre, une cartographie spatiale a été réalisée soit directement à partir de données bibliographiques, soit à partir de données collectées dans des bases de données préexistantes. Les descriptions et interprétations de ces cartes sont qualitatives et quantitatives quand cela est possible. Les informations obtenues dans la zone globale du pays Charolais-Brionnais seront confrontées à celles de la zone classée "Vulnérable" par la Directive Nitrates. Cela va permettre de mettre en évidence de potentiels facteurs ayant pu favoriser une contamination en nitrates des masses d'eau superficielles.

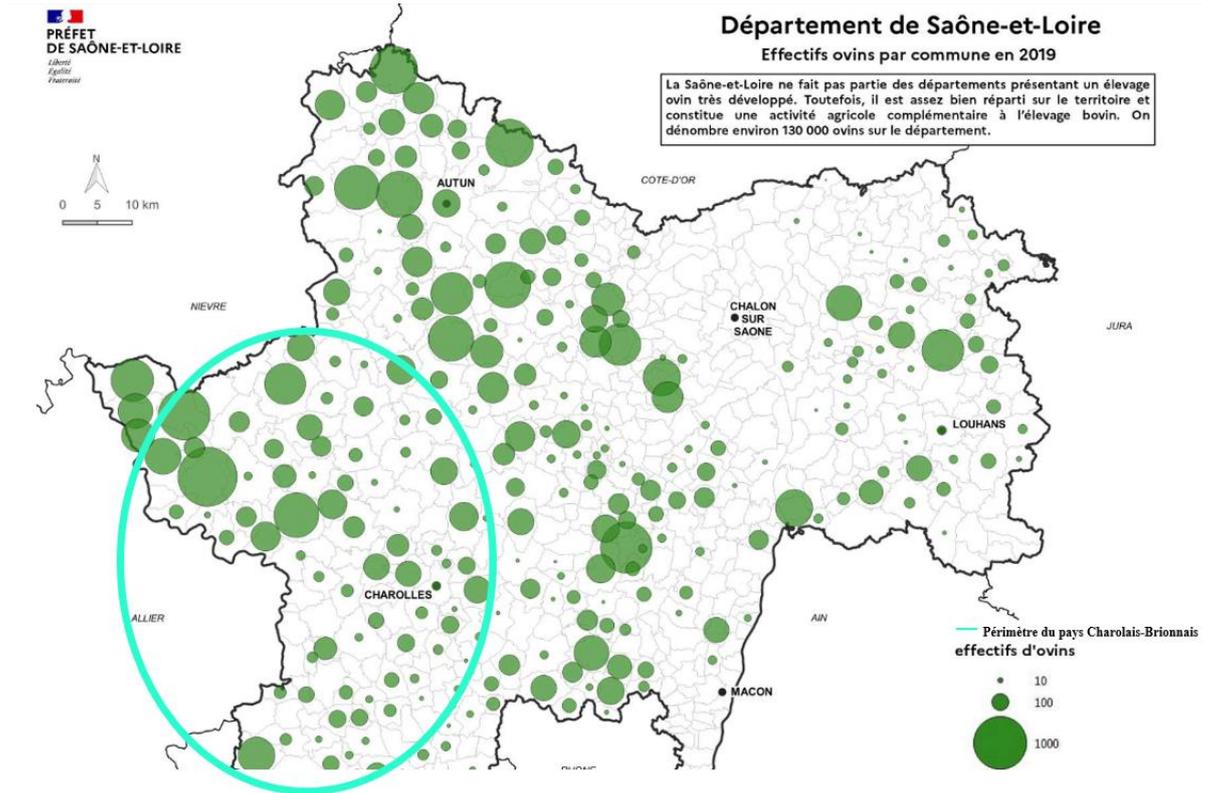
3. Paramètres liés aux pressions

3.1. Effectifs des cheptels

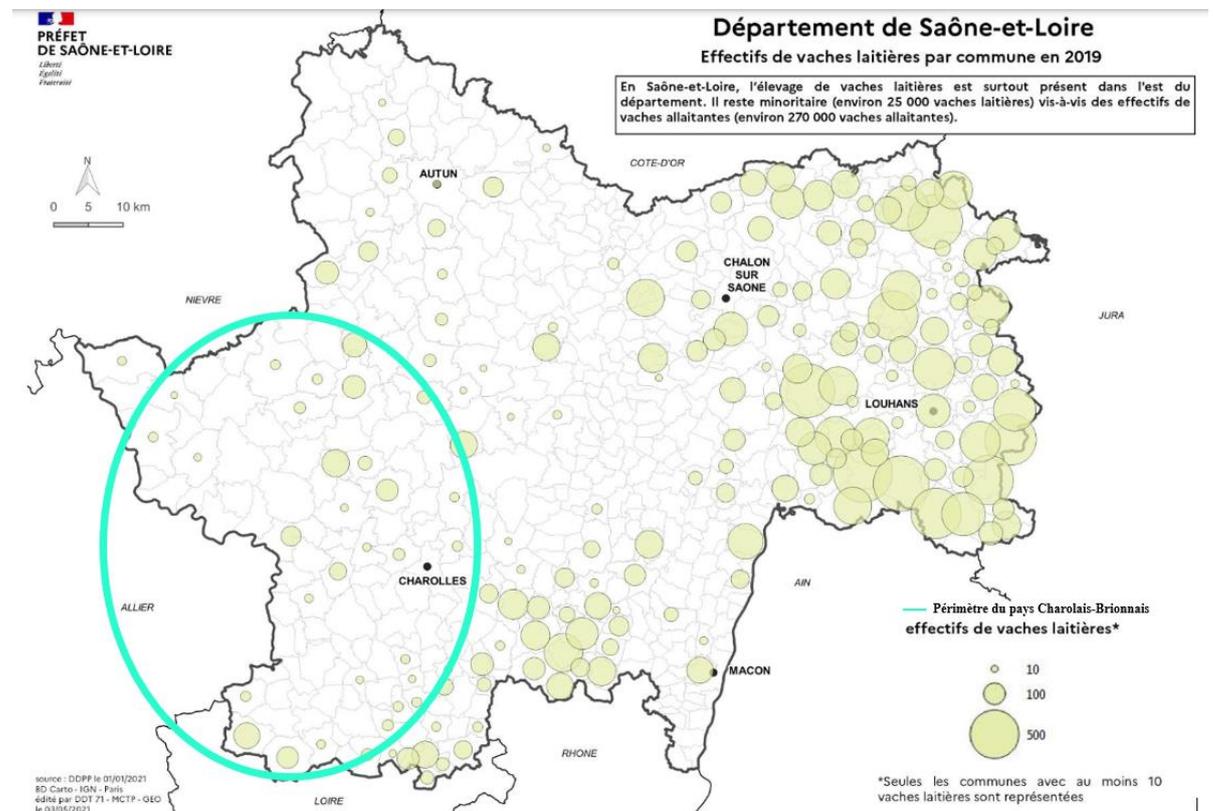
La cartographie des effectifs des cheptels nous a été transmise par E. Perradin, conseiller en culture à la Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire. N'ayant pas eu accès à la base données de ces cartes, elles n'ont pas pu être analysées quantitativement. Dans le département de Saône-et-Loire, 221 exploitations sont orientées bovin gras, dont 100 sont présentes dans le Charolais-Brionnais. On observe que la très grande majorité des exploitations sont représentées par des bovins allaitants (Figure 6, A), parfois associés à des ovins (Figure 6, C). L'autre partie importante des exploitations est représentée par des bovins laitiers (Figure 6, B).



(B)



(C)



(D)

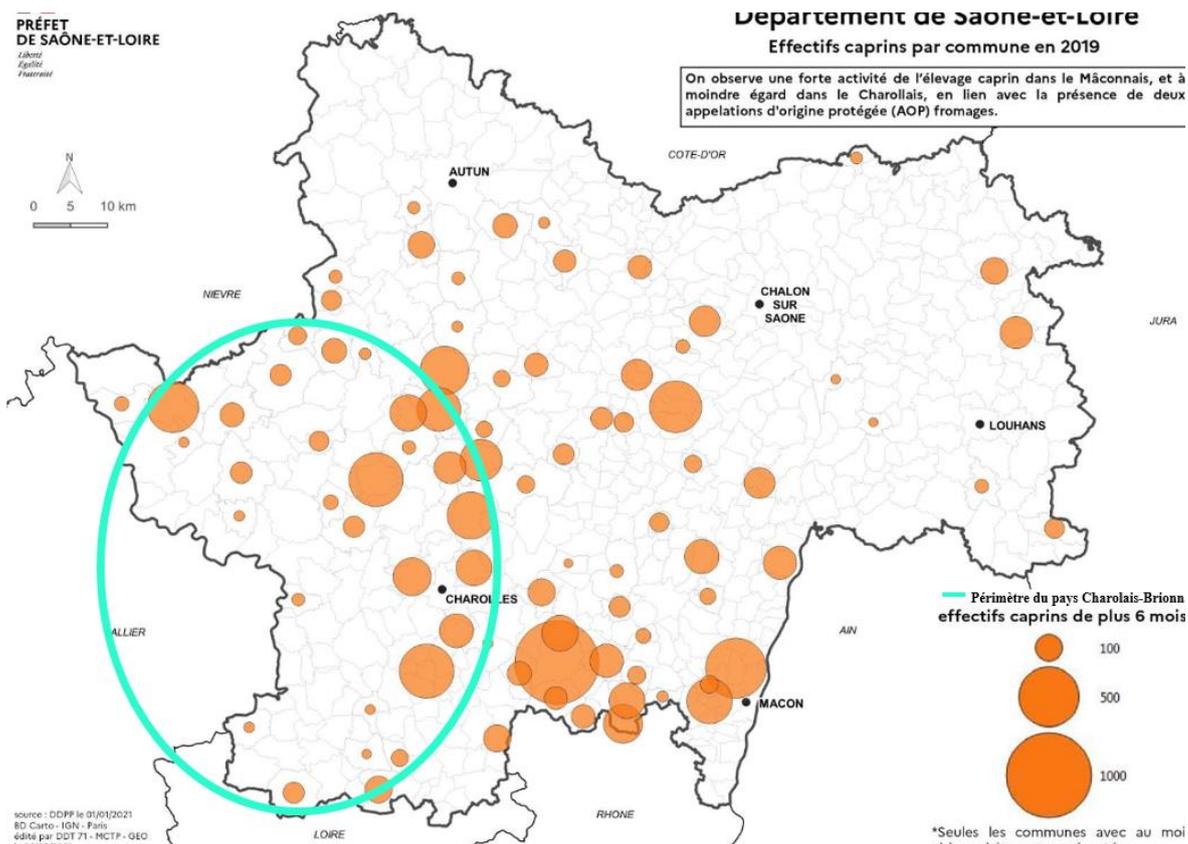


Figure 6 : Cartes représentant les effectifs des vaches allaitantes (A), vaches laitières (B), ovins (C), et caprins (D) par communes en 2019 dans le département Saône-et-Loire. Source : E. Perradin, Conseiller en culture, Chambre d'Agriculture Saône-et-Loire, Communication orale et écrite, 2021

La pratique agricole principale dans le pays du Charolais-Brionnais est l'élevage extensif allaitant et d'engraissement. Ce type d'activité privilégie l'utilisation de grande surface herbagère avec peu d'animaux.

Les surface herbagère on des normes à respecter, on parlera d'UGB (Unité Gros Bétail). Un chargement faible est d'environ 0,8 UGB/ha et un chargement fort est de 1,6 UGB/ha. Dans le Charolais-Brionnais, le chargement moyen varie entre 1,4 UGB/ha pour le Brionnais, 1,2 UGB/ha pour le Charolais et de 1 à 1,2 UGB/ha pour le Bourbonnais (E.Perradin et N.Morin, Conseillers en culture, Chambre d'Agriculture Saône et Loire, Communication orale, 2021). On sait que pour chaque espèce est associé un UGB (Tableau 2) :

Taureaux, vaches et autres bovins de plus de 2 ans et équidés de plus de 6 mois	1 UGB
Bovins entre six mois et deux ans	0,6 UGB
Bovins de moins de six mois	0,4 UGB
Ovins et caprins	0,15 UGB

Tableau 2 : Coefficients UGB utilisés pour différents types d'animaux des troupeaux bovins, ovins et caprins en France (Source : Benoit et Veysset, 2021)

3.2. Occupation du sol

La réalisation de la cartographie des types de couverture du sol (Figure 7) a été réalisée selon la nomenclature du Corine Land Cover (CLC) de niveau 3 (Corine Land Cover - 2006).

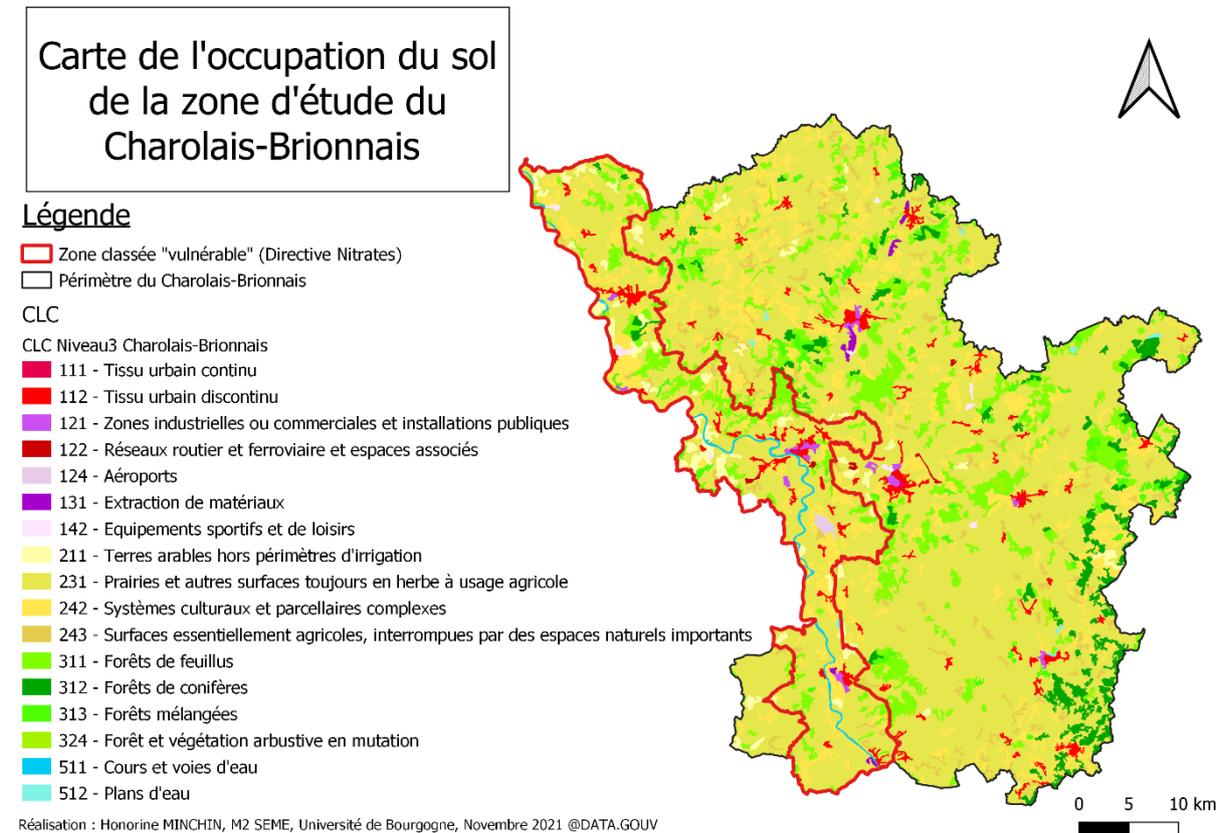


Figure 7 : Carte de l'occupation des sols de la zone d'étude du Charolais-Brionnais. (D'après le CLC de 2006)

Dans la zone du Charolais-Brionnais, les principaux types d'occupation des sols sont d'abord les prairies avec 64%, puis les systèmes culturaux et parcellaires complexes avec 12%, suivis des forêts de feuillus avec 9% et finalement des forêts de conifères avec 3%. La répartition au sein de la "Zone Vulnérable" est similaire avec des prairies à 58%, les systèmes culturaux et parcellaires complexes avec 14%, les forêts de feuillus avec 10% et les terres arables hors périmètres d'irrigation à 5%. Le Charolais-Brionnais possède donc une occupation des sols à majorité de prairies.

Les prairies représentent également une grande part de la Surface Agricole Utile (SAU) des communes (Figure 8) avec une distinction faite entre les prairies permanentes et les prairies intermédiaires. Dans le Charolais-Brionnais, les prairies permanentes représentent 75% à 80% des prairies, cette valeur pouvant être supérieure à 95% au sein de certaines exploitations agricoles.

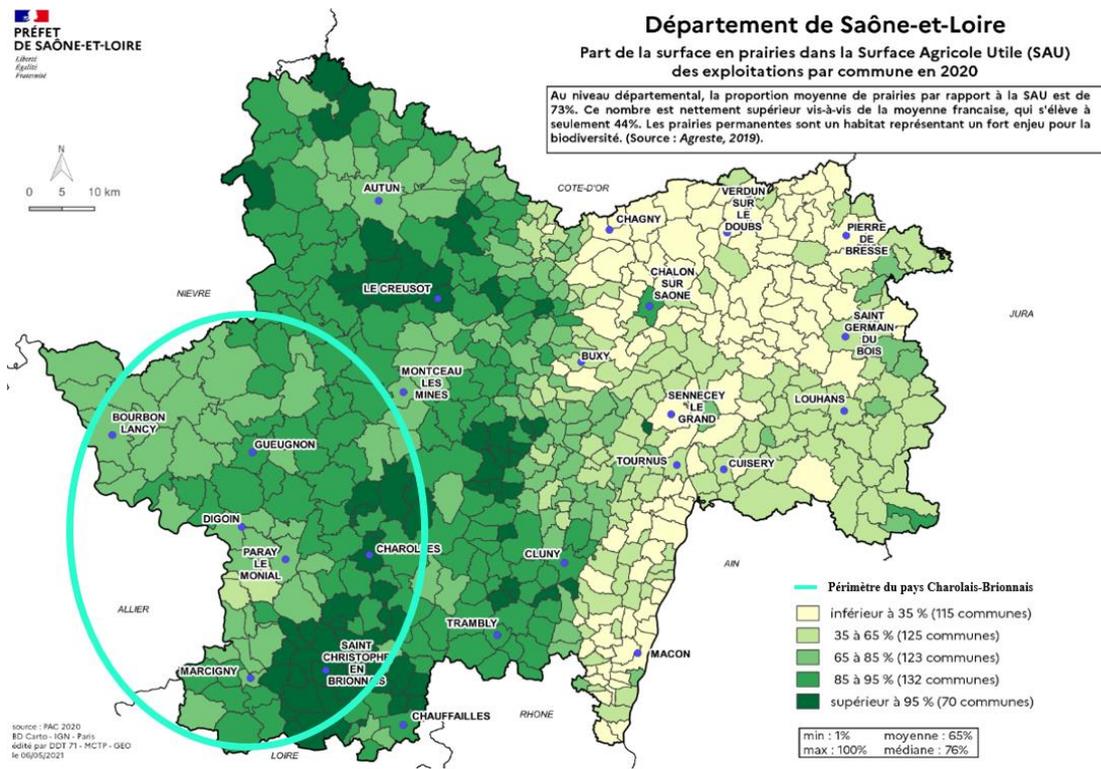


Figure 8 : Carte de la surface en prairies dans la Surface

Agricole Utile par commune en 2020 (E.Perradin, Conseiller en culture, Chambre d'Agriculture Saône et Loire, Communication orale et écrite, 2021)

4. Paramètres de transferts et transformations

4.1. Géologie

A partir des couches shapefile géologiques disponibles sur Info Terre (site du BRGM), une carte géologique synthétique du Charolais-Brionnais a été créée en découpant au sein de celle-ci le périmètre de la zone d'étude. Un regroupement des lithologies selon leurs caractéristiques de composition a été effectué et représenté (Figure 9).

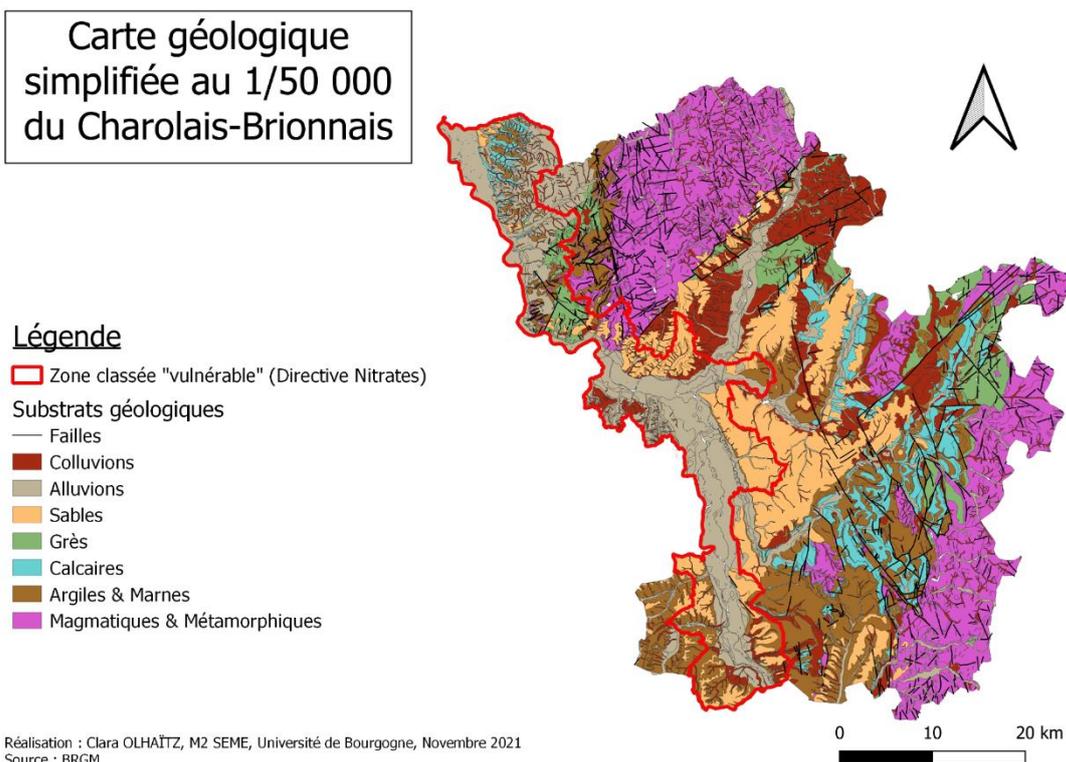


Figure 9 : Carte des grandes familles géologiques simplifiées avec le réseau de failles du Charolais-Brionnais au 1/50 000 (D'après les données géologiques d'Info Terre du BRGM)

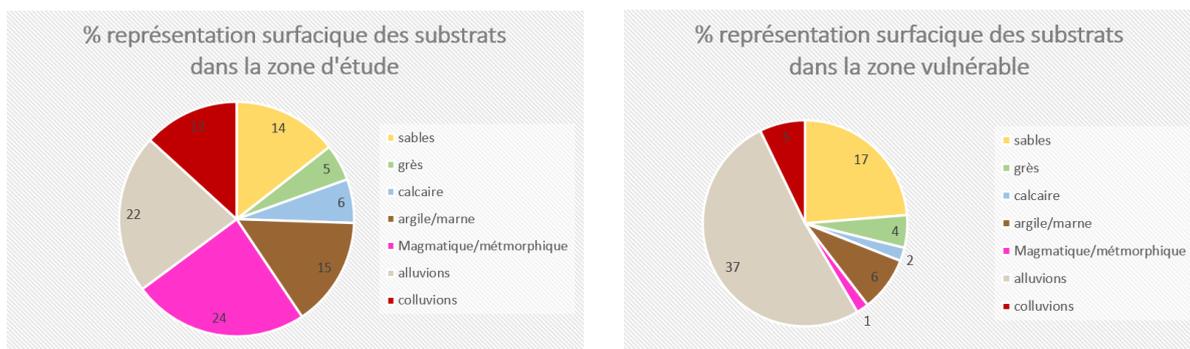


Figure 10 (A) et (B) : Graphiques circulaires représentant les % surfaciques des substrats géologiques sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, par rapport à la carte géologique simplifiée (Figure 9)

On peut observer une grande hétérogénéité des substrats dans la zone d'étude avec des répartitions surfaciques différentes (Figure 10, A) : 24% de substrats magmatiques/métamorphiques, 22% d'alluvions, 15% argilo/marneux, 14% sableux, 13% de colluvions, 6% de calcaires, 5% de grès. La zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, correspondant à la plaine alluviale de la Loire, est représentée quant à elle par une majorité d'alluvions et de sables, à des valeurs de 37% et 17% respectivement (Figure 10, B).

4.2. Pédologie

Une cartographie des pédopaysages a été effectuée (Figure 11), en regroupant les parties du territoire ayant les mêmes propriétés de substrats, d'occupation du sol, physico-chimiques, etc... Pour cela, les couches shapefile et les bases de données provenant des Référentiel Régionaux Pédologiques de Saône-et-Loire (RRP71) de 2005 fournies par AgroSup et l'INRAe, et de l'Allier (RRP03) de 2012 fournies par VetAgro Sup ont été utilisés. La méthode pour simplifier la représentation graphique, a été d'associer l'Unité Typologique de Sol (UTS) majoritaire au sein d'une Unité Cartographique de Sol (UCS), puis de découper le périmètre de la zone du Charolais-Brionnais dans les polygones de ces couches.

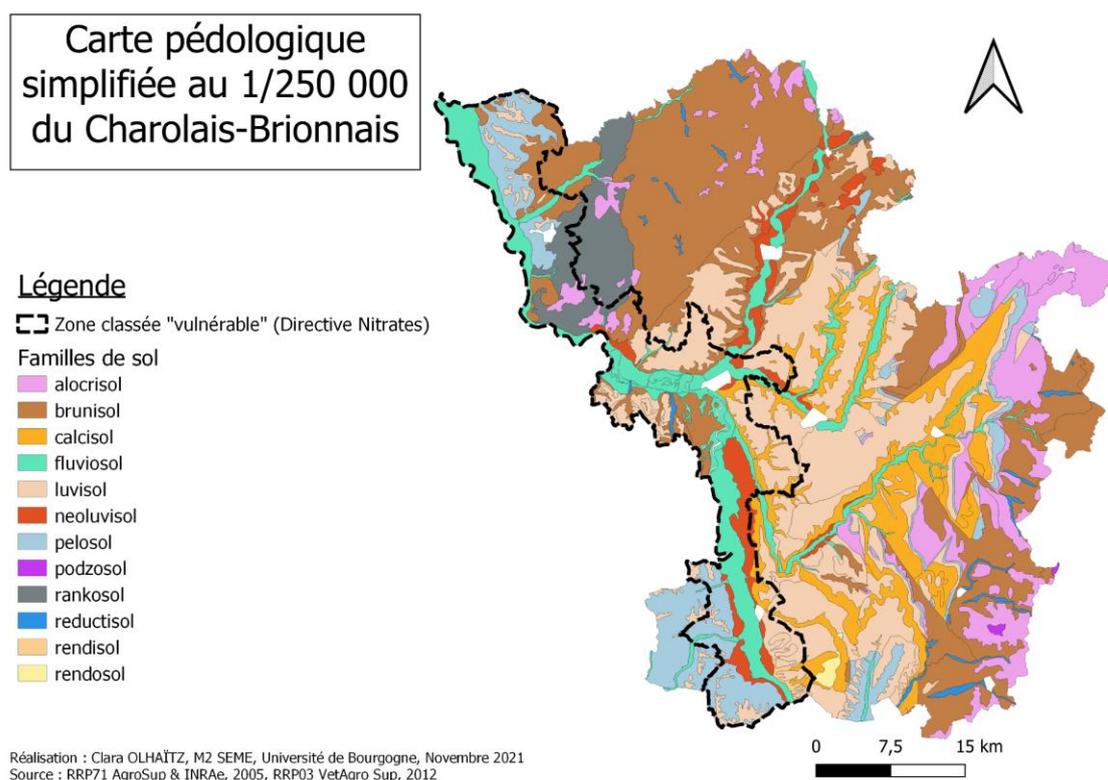


Figure 11 : Carte des grandes familles de sols simplifiées Charolais-Brionnais au 1/250 000 (D'après les bases de données et les fichiers shapefile du Référentiel Régional Pédologique de Saône-et-Loire (RRP71) de 2005 fournies par AgroSup & l'INRAe, et du Référentiel Régional Pédologique de l'Allier (RRP03) de 2012 fournies par VetAgro Sup.

Comme dans la cartographie géologique, on retrouve une grande hétérogénéité de familles de sol dans le Charolais-Brionnais, ayant toutes des caractéristiques (Annexe 1) et des répartitions surfaciques différentes (Figure 12, A et B). Les zones blanches correspondent aux occupations de surface de type "urbaine" et n'ont donc aucune UCS associées sur cette carte. Dans la zone d'étude, on observe une grande proportion à hauteur de 30% des Brunisols et 24% de Luvisols, puis 10% d'Alocrisols, 10% de Calcisols, 9% de Fluviosols, 8% de Pelosols, 4% de Rankosols, 3% de Neoluvisols, et moins d'1% de Podzosols et de Réductisols (Figure 12, A). Concernant la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, on trouve également une hétérogénéité de sols avec pour représentations surfaciques majoritaires 25% de Fluviosols et 23% de Luvisols, puis 17% de Pelosols, 13% de Brunisols, 8% de Néoluvisols, 4% de Calcisols et 2% d'Alocrisols (Figure 12, B).

En termes de comparaison entre la zone d'étude globale et la zone classée "vulnérable", on peut noter une représentation de presque 3 fois plus de Fluvisols et 2 fois plus de Pelosols dans la zone classée "vulnérable". En revanche il apparaît 2 fois moins de Brunisols, plus de 2 fois moins de Neoluvisols et de Calcisols, et 5 fois moins d'Alcristols. Les Podzosols, Rankosols et Réductisols ne sont pas présents dans la zone classée "vulnérable".

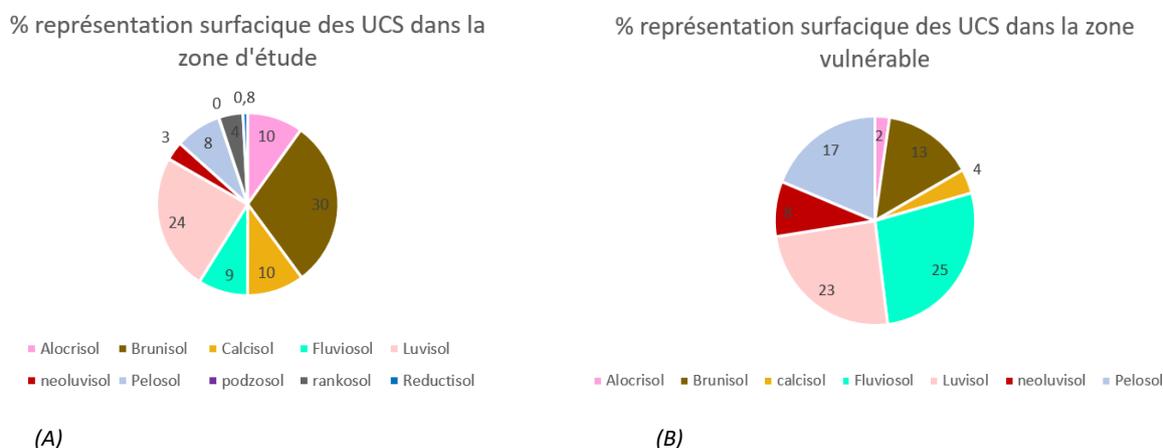


Figure 12 : Graphiques circulaires représentant les % surfaciques des Unités Cartographiques de Sol (UCS) sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, par rapport à la carte pédologique simplifiée (Figure 11)

4.3. Épaisseur des sols

Une carte des épaisseurs moyennes des sols par UCS a été produite (Figure 13) à partir des épaisseurs moyennes des UTS (Unités Typologiques de Sols) présentes au sein de chaque UCS (Unités Cartographiques de Sols), obtenues dans les bases de données des RRP71 de 2005 fournies par AgroSup et l'INRAE, et RRP03 de 2012 fournies par VetAgro Sup, utilisées précédemment pour la carte pédologique simplifiée (Figure 10). Les épaisseurs varient entre 23 cm pour les sols les plus fins et 120 cm pour les plus épais dans la zone d'étude, avec des effectifs importants pour les sols allant de 40 cm de profondeur à plus de 100 cm, soit des sols moyennement épais à épais (Figure 14, A). Concernant la zone vulnérable, on note un effectif majoritaire de sols épais avec une profondeur supérieure à 100 cm (Figure 14, B).

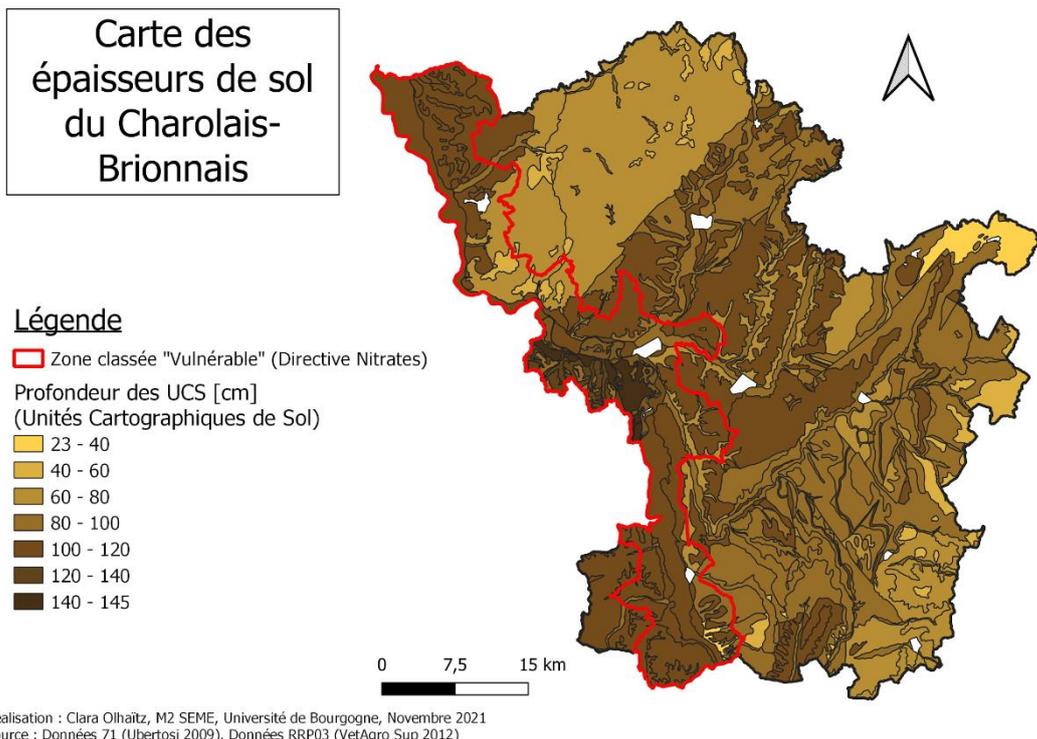


Figure 13 : Carte des épaisseurs de sols en cm du Charolais-Brionnais associées aux UCS (Unités Cartographiques de Sols)

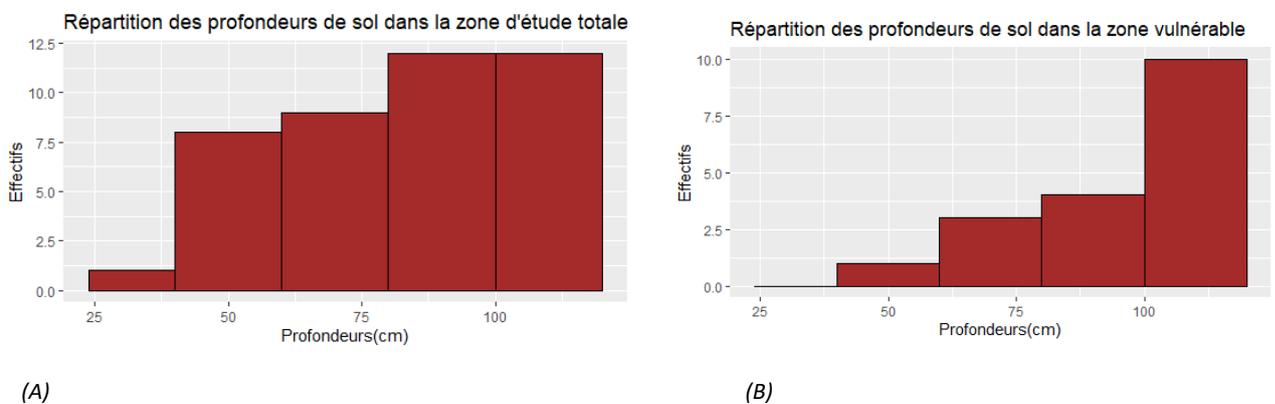


Figure 14 : Histogrammes représentant la répartition des effectifs de profondeurs de sols sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, relatifs à la carte des épaisseurs de sol (Figure 13)

4.4. Réserve utile

Une carte des réserves utiles en mm des sols associées à chaque UCS a été produite (Figure 15). Les calculs de réserves utiles pour chaque UTS ont été effectués par M. Ubertosi (Maître de Conférences à Agrosup Dijon) selon les fonctions de pédotransfert de Bruand (2004), avec les données issues du RRP71 de 2005 fourni par AgroSup et l'INRAe. Par la suite, nous avons réalisé une moyenne des réserves utiles des UTS présentes dans chaque UCS. Les réserves utiles appartenant au département de l'Allier n'ayant pas été calculées, la zone apparaît en grisé.

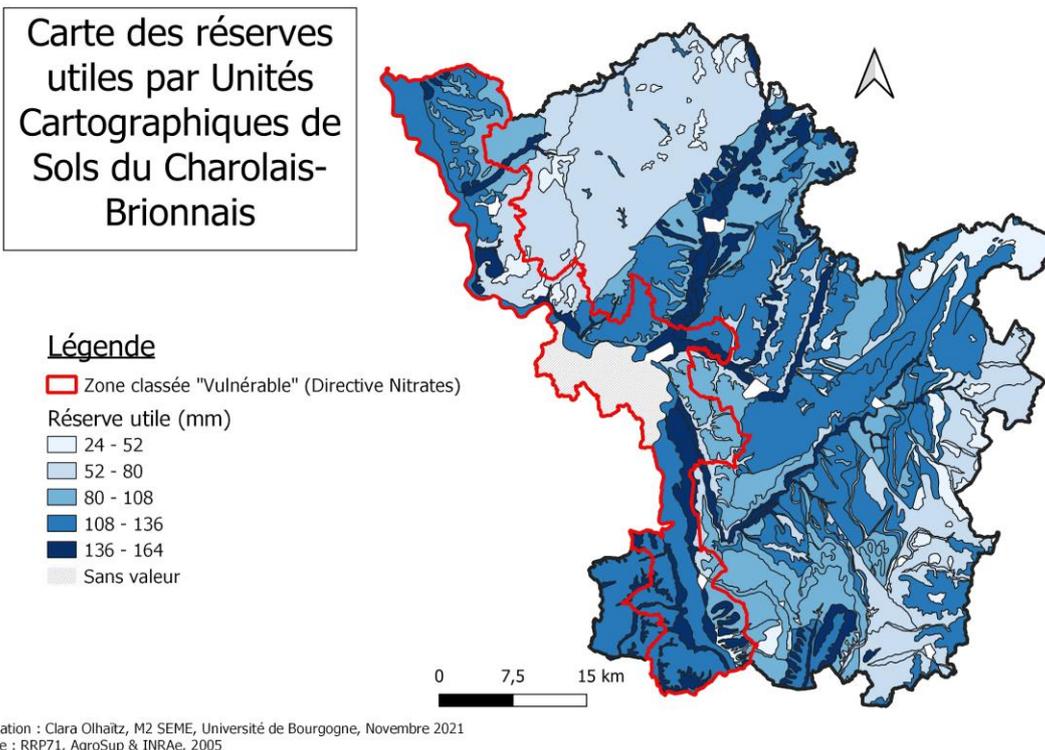


Figure 15 : Carte des réserves utiles en mm par UCS du pays Charolais-Brionnais

Les réserves utiles sur la zone d'étude varient de 24 mm à 164 mm. La répartition des différentes tailles de réserve utile sur la zone Charolais-Brionnais est très hétérogène (Figure 16, A). Concernant la zone classée "Vulnérable" par la Directive Nitrates, la répartition des tailles de réserve utile est également hétérogène, avec un effectif plus grand pour les réserves utiles variant de 80 cm à 100 cm environ (Figure 16, B).

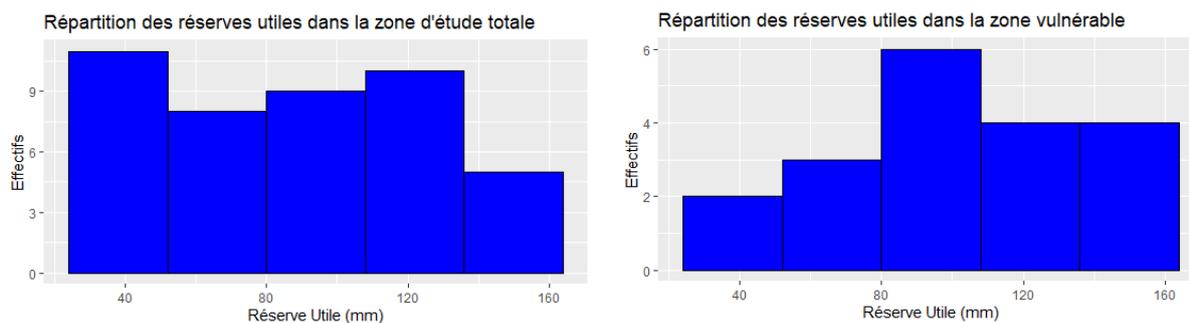


Figure 16 : Histogrammes représentant la répartition des réserves utiles sur (A) la zone d'étude et (B) la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, relatifs à la carte des réserves utiles en mm (Figure 15)

4.5. Topographie

Concernant l'étude de la topographie de la zone du Charolais Brionnais, deux cartes ont été réalisées, l'une représentant les courbes de niveaux (Figure 17) et l'autre les pourcentages de pentes (Figure 18), toutes deux en prenant pour base un MNT (Modèle Numérique de Terrain) à 75 m (BD Alti, IGN).

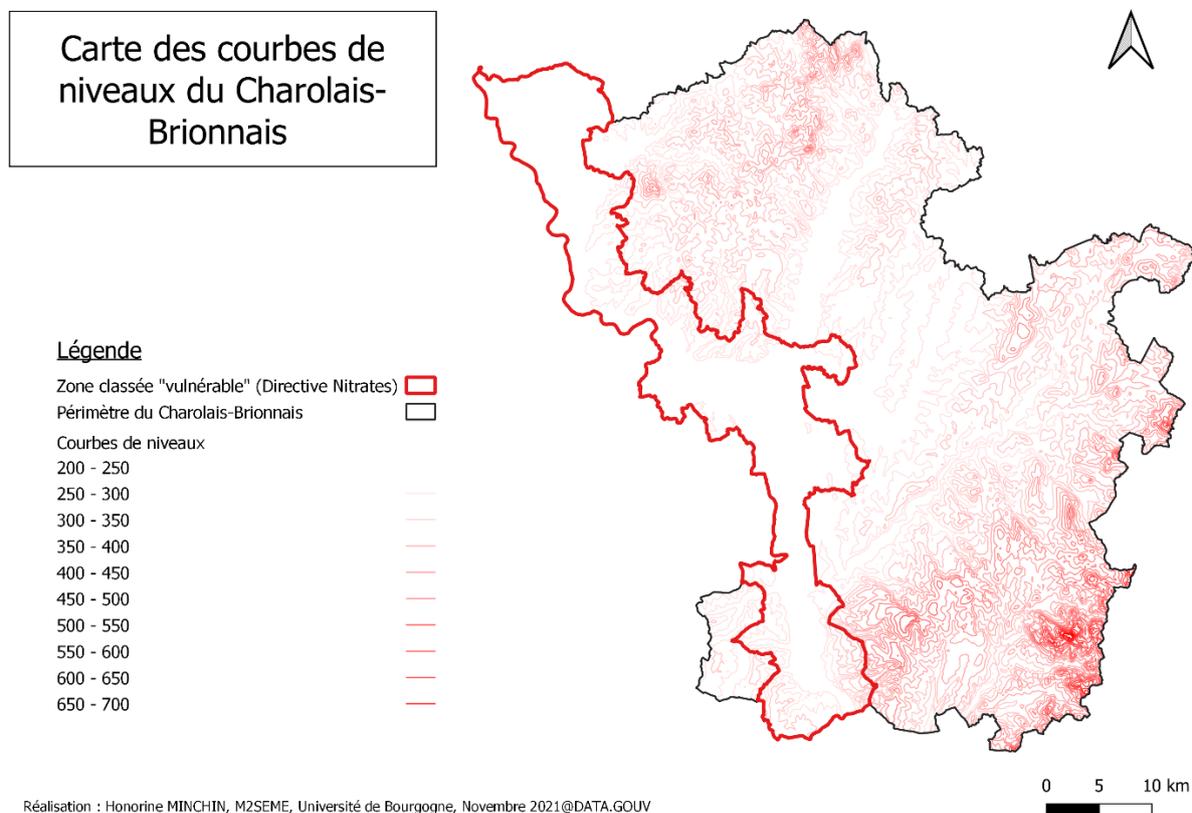


Figure 17 : Carte des courbes de niveaux à intervalles de 50 m du Charolais-Brionnais

On observe que les zones possédant les altitudes les plus élevées (Figure 17) correspondent aux zones avec les pourcentages de pente les plus forts. L'altitude la plus faible se situe dans la zone dite "vulnérable" au titre de la Directive Nitrates. En effet, le gradient d'altitude de la zone d'étude est compris entre 200 m et 700 m. Ces variations d'altitude traduisent des différences de reliefs se présentant par quelques monts et des paysages collinaires relativement homogènes.

Ainsi, si l'on regarde une à une les trois petites régions agricoles qui composent la zone d'étude, on note que le paysage de la Sologne-Bourbonnais est majoritairement représenté par un relief collinaire dont les altitudes moyennes sont comprises entre 200 m et 370 m. Les reliefs les plus marqués sont localisés au nord-est de cette petite région agricole, plus particulièrement au contact du Morvan et de la vallée de l'Arroux. Il s'exprime par une succession de monts ayant des altitudes comprises entre 400 et 506 m au point culminant du mont Dardon (*Atlas des paysages de Saône-et-Loire*).

Le Charolais quant à lui présente un relief relativement homogène, principalement composé de collines à larges ondulations ainsi que de vallées peu encaissées et à fond large. L'altitude moyenne de cette petite région agricole est comprise entre 250 et 350 m d'altitude. Sur la bordure du Charolais, le relief augmente progressivement pour culminer à 603 m d'altitude au mont Saint-Vincent (*Atlas des paysages de Saône-et-Loire*).

Pour terminer, le Brionnais présente des reliefs collinaires plus marqués que ceux du Charolais avec des altitudes moyennes comprises entre 300 et 400 m. Tout comme le Bourbonnais, cette petite

région agricole possède quelques-uns des monts les plus élevés du pays Charolais-Brionnais, particulièrement localisés au cœur du Haut-Brionnais et au contact des Monts du Beaujolais. C'est au sein de ces monts élevés tels que la butte de Suin, le mont St-Cyr ou encore la montagne de Dun, que les vallées sont les plus encaissées du pays Charolais-Brionnais (*Atlas des paysages de Saône-et-Loire*).

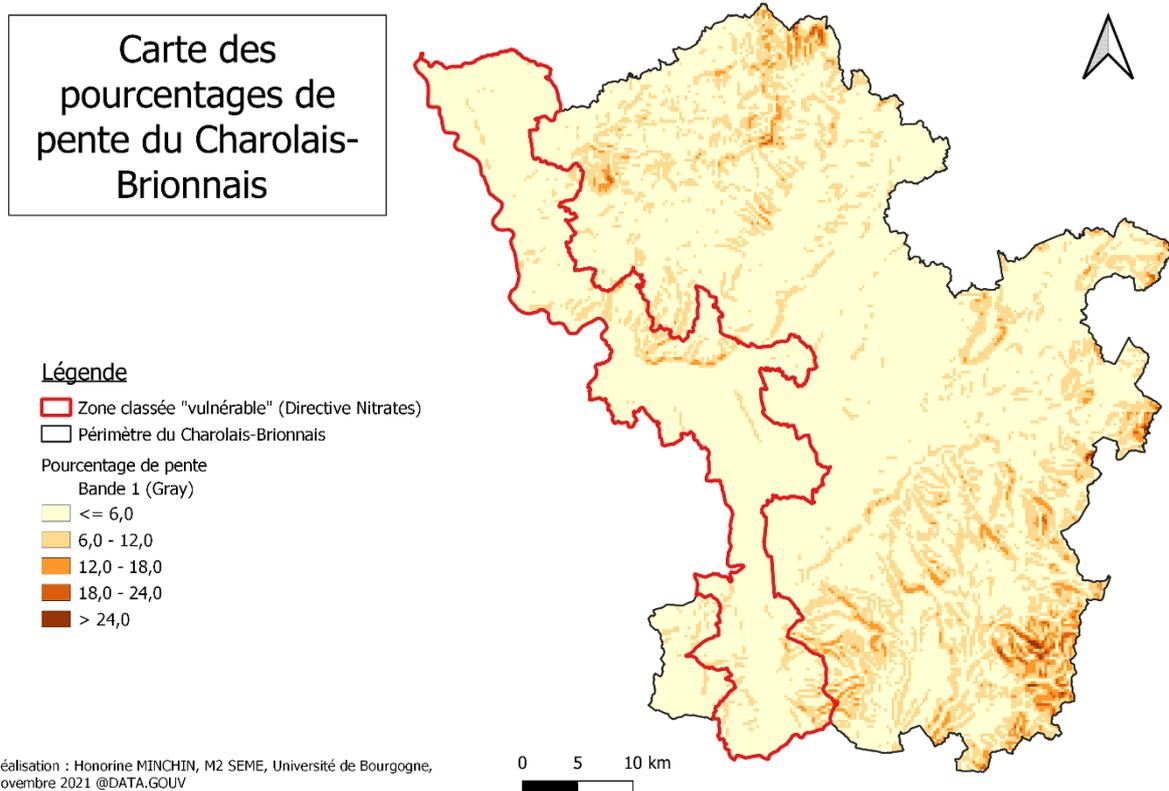


Figure 18 : Carte des pourcentages de pente du Charolais-Brionnais

La carte des pourcentages de pentes (Figure 18) a été obtenue à partir du MNT à 75m et montre une gamme de valeur allant de 6% pour les pentes les plus faibles à 24% pour les pentes les plus élevées. Sur cette carte, on observe que dans la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates, qui correspond en majorité à la plaine alluviale de la Loire, le pourcentage de pente est faible (inférieur ou égal à 6%). Ces faibles pentes s'étendent également dans la partie centrale du Charolais-Brionnais. On peut observer au Nord et au Sud du Charolais-Brionnais des pentes plus fortes supérieures à 24%.

4.6. Synthèse des paramètres liés aux pressions et aux transferts de nitrates

La comparaison des paramètres caractéristiques du pays Charolais-Brionnais d'une part et de la zone classée "vulnérable" d'autre part, est présentée Tableau 3. Les recherches bibliographiques effectuées en Partie 1 de ce rapport nous permettent de discuter ces résultats par rapport à leur impact sur le risque de contamination des eaux superficielles en nitrates, conformément au modèle créé en partie 2.

Paramètres	Zone "vulnérable" au sens de la Directive Nitrates (délimitation juillet 2021)	Zone globale du Charolais-Brionnais
Effectifs des cheptels	Présence de bovins allaitants, vaches laitières, ovins et caprins	Présence de bovins allaitants, vaches laitières, ovins et caprins
SAU prairies	De 35% à plus de 95%	De 35% à plus de 95%
Occupation du sol	Majorité de prairies (58%)	Majorité de prairies (64%)
Géologie	Majorité d' alluvions (37%) et de sables (17%)	Hétérogénéité (Alluvions, Colluvions, Sables, Grès, Calcaires, Argiles & Marnes, Roches magmatiques & Métamorphiques)
Pédologie	Grande hétérogénéité de sols	Tendance des sols à être en excès d'eau
Épaisseur des sols	Majorité de sol épais (≥ 100 cm)	Majorité entre 40 cm et 120 cm
Réserve utile	Importante (entre 80 et 160mm)	Variable (20 à 160mm)
Intensité des pentes	Faible (0% à 18%)	Modérée (0% à $\geq 24%$)
Altitudes	Modérées (jusqu'à 450m)	Hétérogènes (de 200m à 700m)

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des observations sur les paramètres du modèle de contamination sur la zone d'étude en comparaison avec la zone classée "vulnérable" par la Directive Nitrates

Tout d'abord si l'on observe les paramètres liés aux pressions, à savoir les effectifs des différents cheptels présents dans le pays Charolais-Brionnais, la part de SAU en prairies ainsi que l'occupation du sol. La comparaison des effectifs des différents cheptels présents et la SAU en prairies sur la zone globale et la zone "vulnérable" n'a pas pu être établie en raison de l'absence de jeux de données SIG. Seule une approche qualitative a été faite. Cependant, les types de cheptel n'ont pas les mêmes productions d'azote épandables, et l'impact sur le taux de nitrate sera donc différent. En effet, les ovins et caprins apporteront en moyenne 5 à 12 kg d'azote par animal présent et par an, les vaches allaitantes 70 kg d'azote par animal présent et par an tandis que les vaches laitières avec la plus grosse production auront un apport de 60 à 130 kg d'azote par animal présent et par an. Pour terminer, l'occupation du sol obtenue avec la carte du Corine Land Cover de niveau 3 met en évidence une majorité de prairie dans la zone d'étude globale ainsi que dans la zone classée "vulnérable". Ce type de couvert végétal ne favorise pas le lessivage des nitrates dans les masses d'eau pendant l'hiver notamment, contrairement à des sols nus par exemple.

Ensuite, des résultats quantitatifs sur les paramètres influençant les transferts et les quantités mobiles de nitrates ont pu être obtenus. Concernant la géologie, la zone globale du pays Charolais-Brionnais contient une grande hétérogénéité de substrats alors que les substrats retrouvés en zone classée

“vulnérable” sont fortement représentés par des lithologies de type alluvions et sableuses, favorables aux perméabilités d’interstice impliquant des vitesses d’écoulements lentes et régulières vers les nappes (SIGES, Seine-Normandie). Les pollutions en nitrates retrouvées dans cette zone-là auraient donc pu être influencées par la typologie des aquifères ayant des vitesses d’écoulements lentes, ce qui pourraient décaler l’apparition des pollutions dans les masses d’eau par rapport aux événements pluvieux les ayant provoqués. Ce phénomène peut être à prendre en compte lors de l’interprétation de la temporalité et l’origine des pollutions en nitrates. Néanmoins, ça ne peut pas être une cause unique, les écoulements hypodermiques étant notamment à prendre en compte dans la contamination des eaux. De plus, cette étude ne porte pas sur les masses d’eaux souterraines.

Concernant les familles de sols retrouvées dans la zone globale et la zone classée “vulnérable”, on remarque que la majorité des familles de sols présents dans la zone vulnérable, à savoir les Fluvisols, Luvisols, et Pelosols, sont des sols qui ont pour caractéristiques communes d’avoir une tendance imperméable ou à être en excès d’eau lors des périodes hivernales ou de crues. Cette tendance n’apparaît pas dans la zone d’étude globale qui contient des familles de sols ayant des caractéristiques très hétérogènes. Cela amène à faire le constat que les sols présents en zone classée “vulnérable”, en plus des très faibles pentes, vont avoir tendance à limiter l’infiltration de l’eau vers les profondeurs et donc limiter la lixiviation des nitrates (Durand & Launay, 2021). Tous les nitrates restant en surface, leur taux sera important et ils seront susceptibles de se déverser directement dans les eaux de surface par des écoulements de surface et de subsurface et, de ce fait, contaminer les masses d’eaux superficielles.

De plus, les brunisols ont pour caractéristiques d’avoir une bonne capacité de rétention de l’azote, mais ils possèdent également une bonne capacité de drainage, ce qui peut amener un risque plus élevé de lixiviation (Vertès, 2007). Ce type de sol étant deux fois moins présent dans la zone vulnérable que dans la zone d’étude globale, on peut faire l’hypothèse qu’en plus de contenir des sols à tendance d’excès d’eau, la zone classée “vulnérable” aurait moins de capacité de stockage d’azote étant donné la plus faible proportion de Brunisols que dans la zone d’étude globale.

Concernant les épaisseurs de sols et la taille des réserves utiles, elles varient sur toute la zone d’étude, mais sont plus importantes au sein de la zone classée “vulnérable”. Cela pourrait impliquer plusieurs phénomènes. Premièrement, un stock d’azote important et durable accessible pour les plantes, mais avec une accumulation de nitrates possible en profondeur suite au lessivage (Mantilla-Morales, 1995). En théorie, les sols plus épais avec une grande réserve utile sont susceptibles d’être moins sujet à des relargages de nitrates lors de forts épisodes pluvieux durant la période hivernale. Néanmoins, cela est uniquement valable dans des cas d’années types où l’hiver est humide avec de fortes pluies récurrentes (Ubertosi, 2021). On peut donc faire l’hypothèse que les sols de la zone classée “vulnérable” sont propices à une contamination en nitrates des eaux suite à des années “sèches”. De plus, le relargage de nitrates sera augmenté par le phénomène décrit par Kaiser & Förster en 1989, selon lequel les plantes assimilent moins l’azote suite à du stress hydrique, qui serait amené dans le cas présent par de longues périodes sèches.

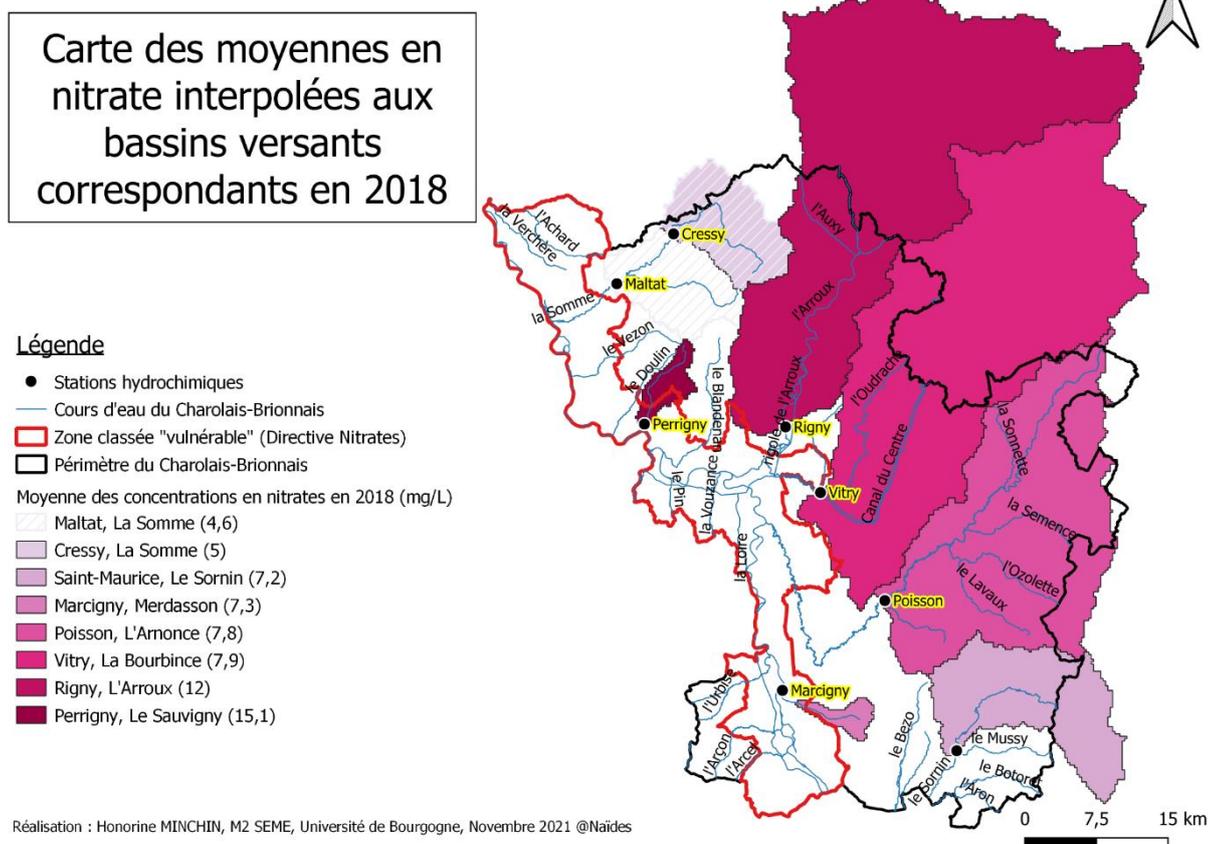
Pour conclure, grâce au modèle établi en partie 2 et à la comparaison des paramètres choisis entre la zone d’étude globale et la zone classée “vulnérable”, il a pu être déterminé un assemblage de paramètres qui seraient susceptibles de favoriser une zone à une contamination en nitrates. En effet, les zones regroupant les caractéristiques d’avoir en termes de cheptel des vaches laitières, sur des sols appartenant aux familles de sols à tendance d’excès d’eau, avec de grandes épaisseurs et réserves utiles, impacteront positivement la pollution en nitrates lors des années “sèches”. En l’occurrence, le rapport de la DREAL datant de février 2021 ayant montré que le pays Charolais-Brionnais a fait face à des années particulièrement sèches depuis 2018, cela aurait donc favorisé le risque de contamination en nitrates.

Dans la suite de l’étude, les conditions climatiques seront donc étudiées et corrélées avec les données hydrochimiques de qualités des masses d’eau superficielles.

5. Qualité des eaux de surfaces par bassins versants

Afin de catégoriser la qualité des masses d'eaux superficielles, un suivi de 8 stations hydrochimiques a été réalisé. Après le calcul et la délimitation des différents bassins versant via le Système d'Information Géographique QGIS, il a été possible de réaliser des cartes représentant les concentrations moyennes en nitrates pour les années 2018, 2019 et 2020 (Figure 19, A, B et C). Les bassins versants représentés ici sont générés à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30m, ainsi qu'à la localisation de 8 stations de qualité des eaux du réseau de surveillance de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, également présents dans la base de données Naïades. Les valeurs de concentrations moyennes de nitrates sont calculées à partir des données disponibles dans cette base de données.

(A)

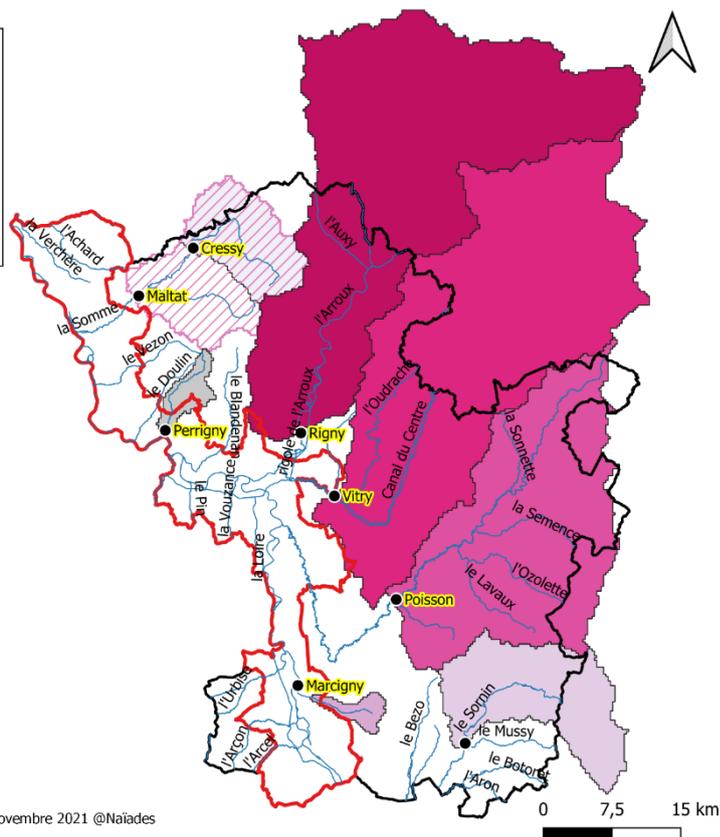


(B)

Carte des moyennes en nitrates interpolées aux bassins versants correspondants en 2019

Légende

- Stations hydrochimiques
 - Cours d'eau du Charolais-Brionnais
 - ▭ Zone classée "vulnérable" (Directive Nitrates)
 - ▭ Périmètre du Charolais-Brionnais
- Moyennes des concentrations en nitrates en 2019 (mg/L)
- Cressy, La Somme (7,9)
 - Saint-Maurice, Le Sornin (9,9)
 - Marcigny, Le Merdasson (11)
 - ▨ Maltat, La Somme (11,4)
 - Poisson, L'Arroux (12,5)
 - Vitry, La Bourbince (12,9)
 - Rigny, L'Arroux (16,5)
 - Perrigny, Le Sauvigny (N/A)



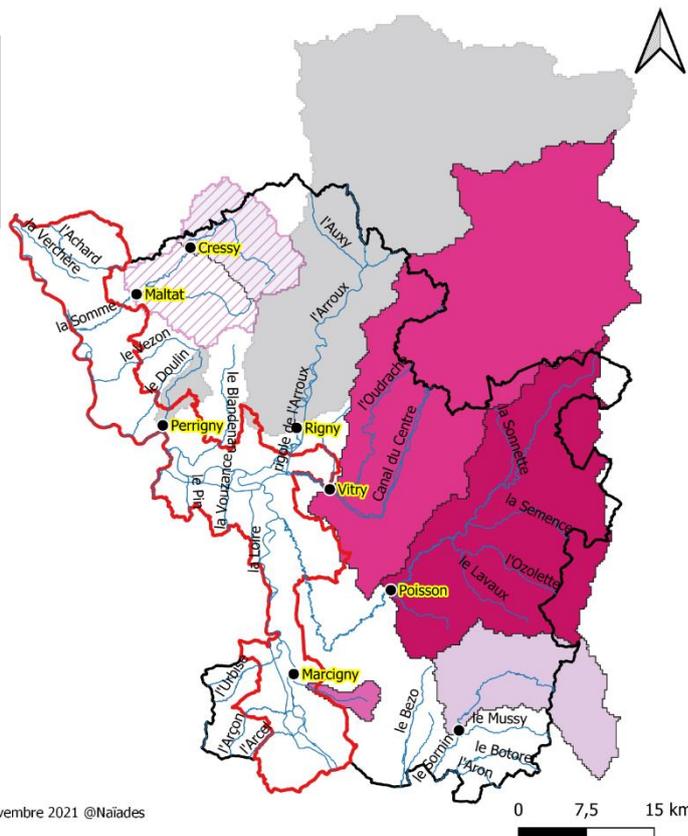
Réalisation : Honorine MINCHIN, M2 SEME, Université de Bourgogne, Novembre 2021 @Naiades

(C)

Carte des moyennes en nitrates inrerpolées au bassins versants correspondants en 2020

Légende

- Stations hydrochimiques
 - Cours d'eau du Charolais-Brionnais
 - ▭ Zone classée "vulnérable" (Directive Nitrates)
 - ▭ Périmètre du Charolais-Brionnais
- Moyennes des concentrations en nitrates en 2020 (mg/L)
- Cressy, La Somme (5,8)
 - Saint-Maurice, Le Sornin (7,5)
 - ▨ Maltat, La Somme (8,8)
 - Marcigny, Le Merdasson (9,5)
 - Vitry, La Bourbince (10,1)
 - Poisson, L'Arroux (10,7)
 - Rigny, Perrigny (N/A)



Réalisation : Honorine MINCHIN, M2 SEME, Université de Bourgogne, Novembre 2021 @Naiades

Figure 19 : Cartes des concentrations maximales en nitrate interpolées aux bassins versant correspondants pour les années 2018 (A), 2019 (B), 2020 (C). Concernant la station de Maltat, son bassin versant a été représenté en hachure car il se superpose avec le bassin de la station de Cressy.

Ces cartes mettent en avant les concentrations moyennes observées entre différents bassins versants se situant tous dans la zone d'étude. Elles illustrent tout d'abord que chaque année, les concentrations moyennes en nitrates sur ces huit bassins versants respectent fréquemment la même hiérarchie. Cela met en évidence que des caractéristiques intrinsèques aux bassins déterminent cette hiérarchie.

Le fait de subdiviser et délimiter les zones affectées par les limites de bassins versants peut servir de pistes pour rattacher les différents paramètres énoncés précédemment (géologie, pédologie, occupation du sol, etc.) à ces mêmes secteurs, et donc de les associer. Cela permettrait d'avoir un regard plus fin ou local sur des études ultérieures. Si l'on sélectionne des zones de la région en fonction des bassins versants et que l'on attribue les caractéristiques occupant la majorité de la surface, il serait éventuellement possible de ranger ces caractéristiques en degré de risque par rapport aux concentrations de nitrates mesurées.

Un exemple avec l'occupation du sol en fonction des bassins versants (Figure 20). Il ressort un pourcentage d'occupation du sol majoritaire (Tableau 4) pouvant aider à expliquer les concentrations observées aux stations hydrochimiques.

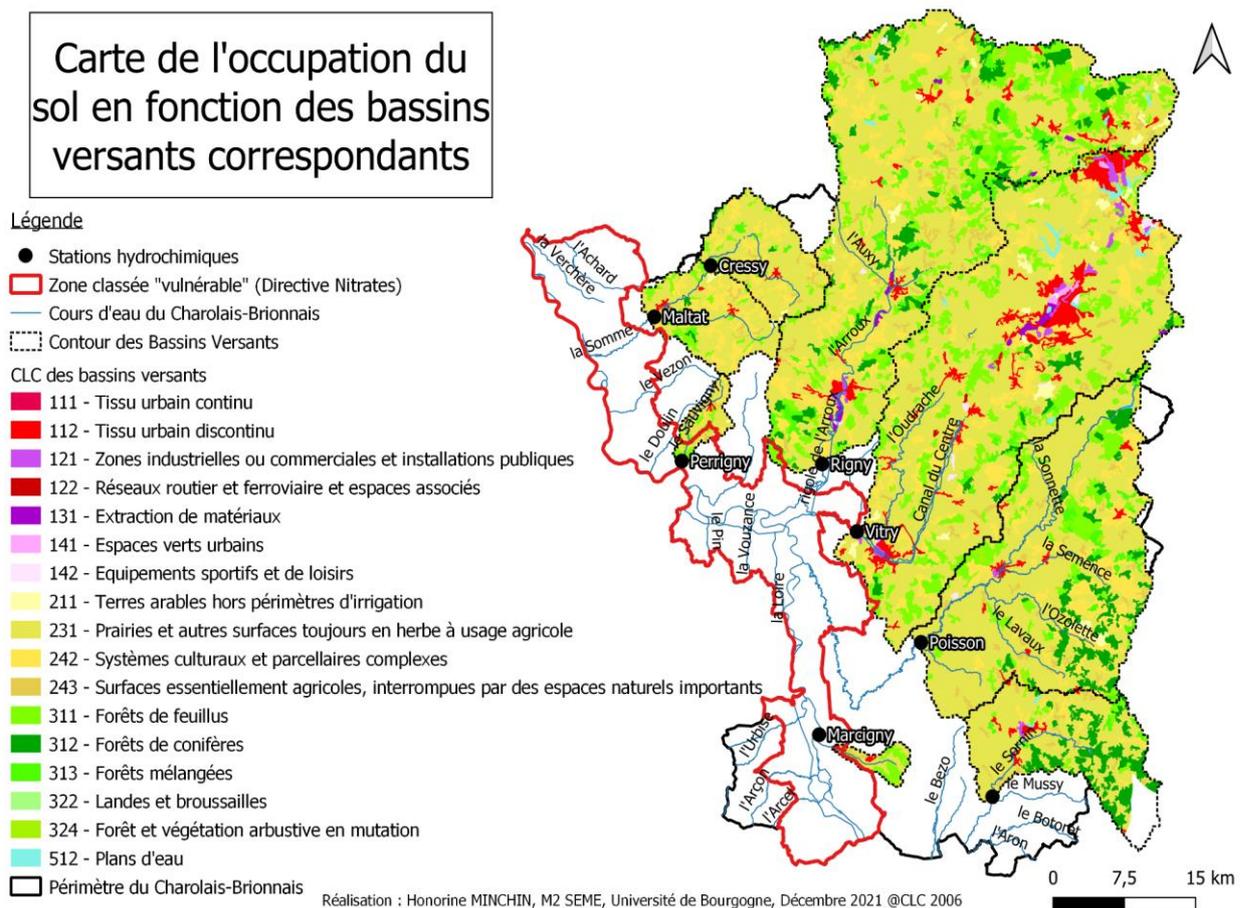


Figure 20 : Carte de l'occupation du sol en fonction des bassins versants correspondants

Cressy	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 67.35% Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 18.64 % Forêts de feuillus : 6.24 %
Maltat	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 63.69% Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 20.05 % Forêts de feuillus : 8.57 %
Perrigny	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 62.06 % Forêts de feuillus : 16.11 % Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 12.62 %
Rigny	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 57.68 % Forêts de feuillus : 16.06 % Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 9.06 %
Vitry	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 62.46 % Forêts de feuillus : 12.46 % Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 9.68 %
Poisson	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 64.06 % Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 12.20 % Forêts de feuillus : 9.28 %
Marcigny	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 56.94 % Forêts de feuillus : 32.16 % Tissu urbain discontinu : 6.09 %
Saint-Maurice	Prairies et surfaces toujours en herbe à usage agricole : 65.18% Forêts de feuillus : 20.30 % Systèmes culturaux et parcellaires complexes : 4.51 %

Tableau 4 : Tableau de l'occupation du sol par bassins versants

Des pistes concernant la typologie (forme et taille) des bassins versants peuvent aussi être explorées. En effet, la typologie caractérise l'ensemble des bassins versants selon deux critères : les zones de transfert et les compartiments de rétention (Haag et Kaupenjohann, 2001). Dans les zones de transfert, les nitrates sont entraînés rapidement, limitant leurs transformations et leurs rétentions. A l'inverse, les compartiments de rétention contribuent à l'intégration des nitrates dans les sols. De plus, la diversité des paysages influence les transferts et les processus de transformation des nitrates (J. Tournebize - 2008).

Cependant il faut aussi souligner que le paramètre étudié ici, en l'occurrence les concentrations de nitrates, expriment mal les quantités de nitrates transportées, mais peuvent en revanche être un critère de détermination de la qualité de l'eau. Afin d'avoir une meilleure quantification de la quantité de nitrates transportés, l'utilisation des flux serait plus pertinente. En effet, en utilisant les flux on prendrait en considération les concentrations en fonction du débit, le degré de précision apporté permettrait des interprétations plus sûres. Les flux sont étudiés lors de la partie suivante.

Partie 3 : Variabilité temporelle des concentrations et des flux de nitrates dans les masses d'eau superficielles

1. Contexte et méthode

Un complément de l'étude de la DREAL réalisée en février 2021 "Révision des zones vulnérables 2020-2021 - Phase de concertation - Analyse et synthèse des données physico-chimiques, hydrométriques et biologiques sur 8 stations DCE du Charolais." a été établi afin de poursuivre le suivi des paramètres caractérisant la qualité de l'eau par rapport aux concentrations en nitrates.

Le complément fait dans l'étude présente reprend une méthodologie similaire à l'étude de février 2021, c'est-à-dire l'étude et l'utilisation des bases de données liées aux 8 stations hydrologiques basées sur la région du Charolais-Brionnais (Figure 21).

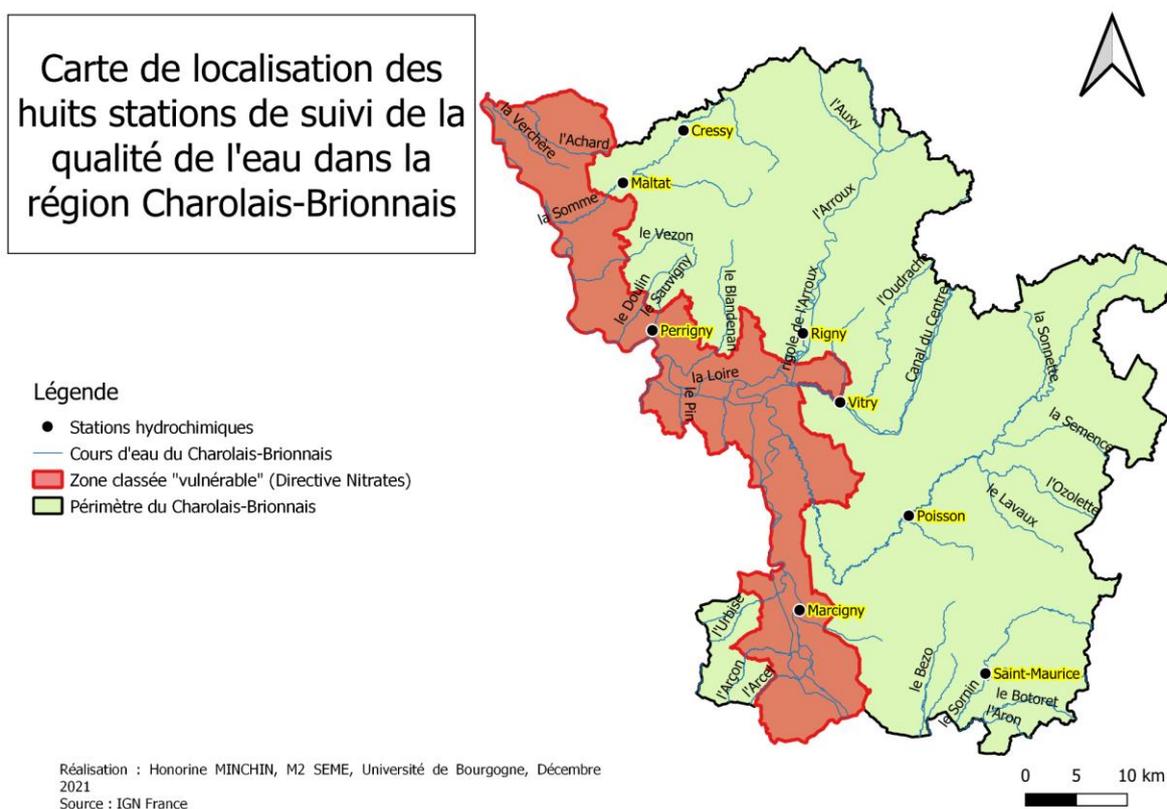


Figure 21 : Carte de localisation des huit stations de suivi de la qualité de l'eau dans la région Charolais-Brionnais

Les jeux de données utilisés ici proviennent de la banque de données Naiades (valeurs de concentrations en nitrates) ainsi que de la banque hydrologique française (débits).

Grâce à cela, des calculs de flux de nitrates ont été effectués afin d'étudier les jeux de données :

$$\text{Flux instantané} = \text{Concentration} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{débit instantané}^3/\text{s}$$

Le flux peut être exprimé directement en masse par unité de temps (g/s ou kg/jour) ou en masse par unité de surface et par unité de temps (kg/km²/jour). La seconde unité est fréquemment utilisée afin de comparer les valeurs entre zones spécifiques, comme des bassins versants par exemple. Il est donc nécessaire d'avoir accès aux valeurs de débit pour calculer les flux. Parmi les 8 stations utilisées ici, seulement 3 stations (Rigny-sur-Arroux, Vitry-en-Charolais et Poisson) possèdent des jeux de données de débits des cours d'eau. Pour deux d'entre elles (Rigny sur Arroux et Vitry-en-Charollais) la mesure du débit est réalisée sur la même station, pour la troisième (Poisson), le débit est mesuré à la station de Montceau l'Etoile située à moins de 15 kilomètres. Les valeurs de débit sont alors raccordées temporellement aux valeurs de concentrations mesurées afin de calculer les flux.

2. Résultats

La figure 20 montre les variations de concentrations en nitrates de 2010 jusqu'au printemps 2021. Le seuil de 18 mg/L représenté par un trait noir horizontal correspond à la concentration seuil pour une bonne qualité des eaux dans un bassin versant selon la Directive Nitrates.

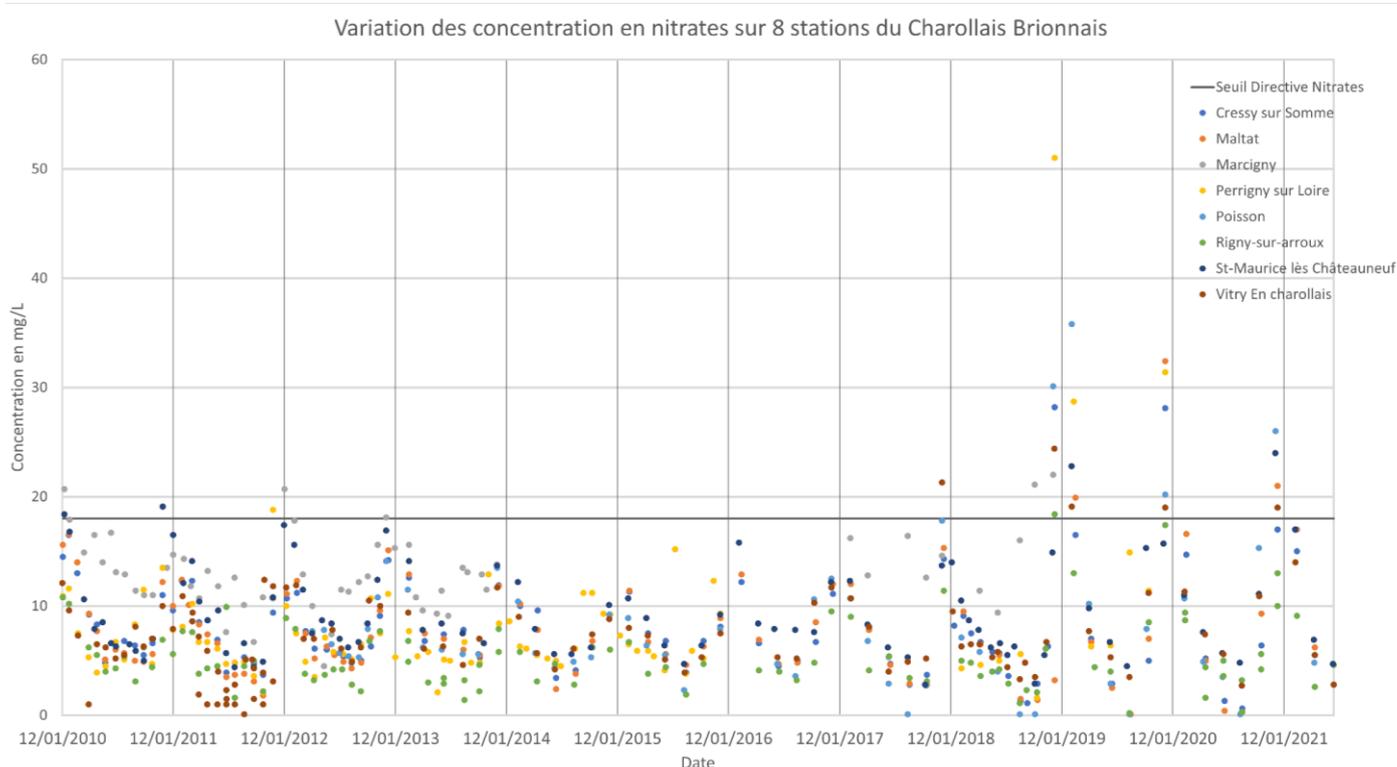


Figure 22 : Variation des concentrations en nitrates sur 8 stations du Charollais-Brionnais, séparée en année civile. Source : Naiades

Globalement, les concentrations oscillent annuellement. Cependant, cette oscillation ne suit pas un cycle constant, mais se rapproche de ce que l'on appelle le cycle hydrologique. Ce cycle décrit l'évolution moyenne du débit de l'eau, il débute au début des périodes de crues, où l'on observe les valeurs de débit les plus élevées, cela correspondant généralement aux périodes de précipitations automnales. Il prend fin à l'issue de la période d'étiage estivale, généralement au mois d'août. Ce cycle permet de catégoriser les différentes périodes de changements de débits sans se limiter par les années civiles (Figure 22).

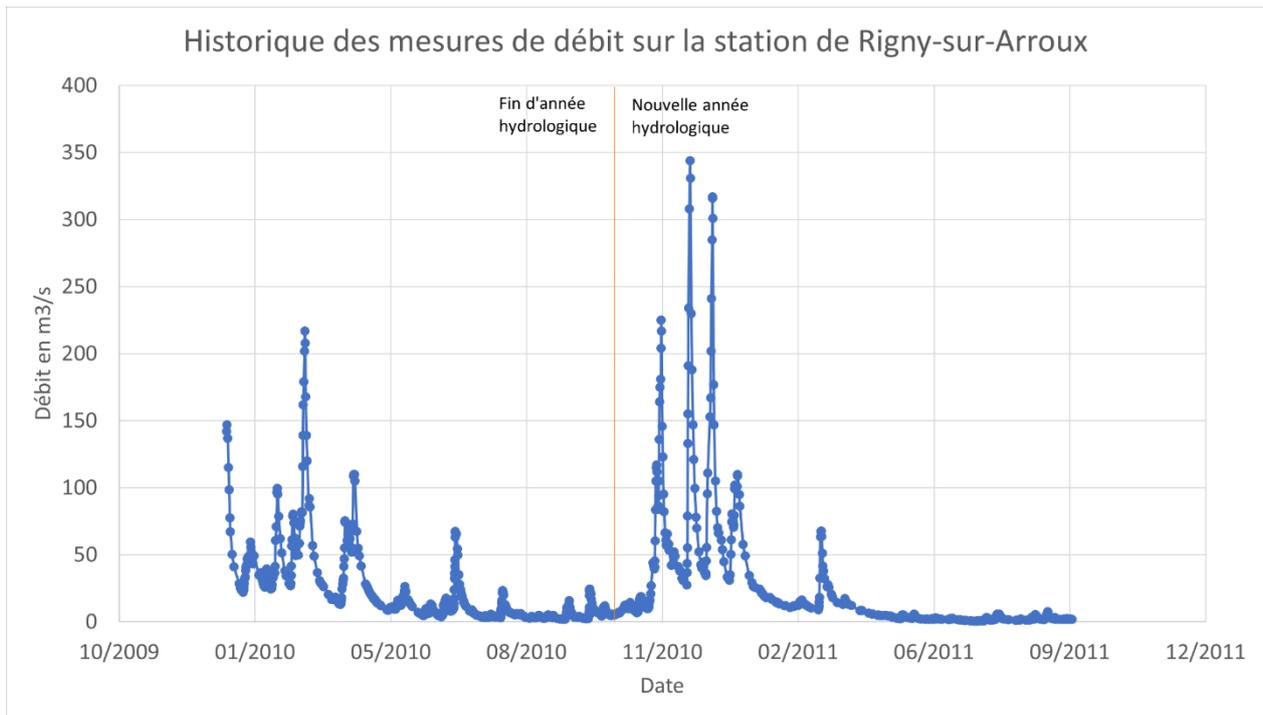
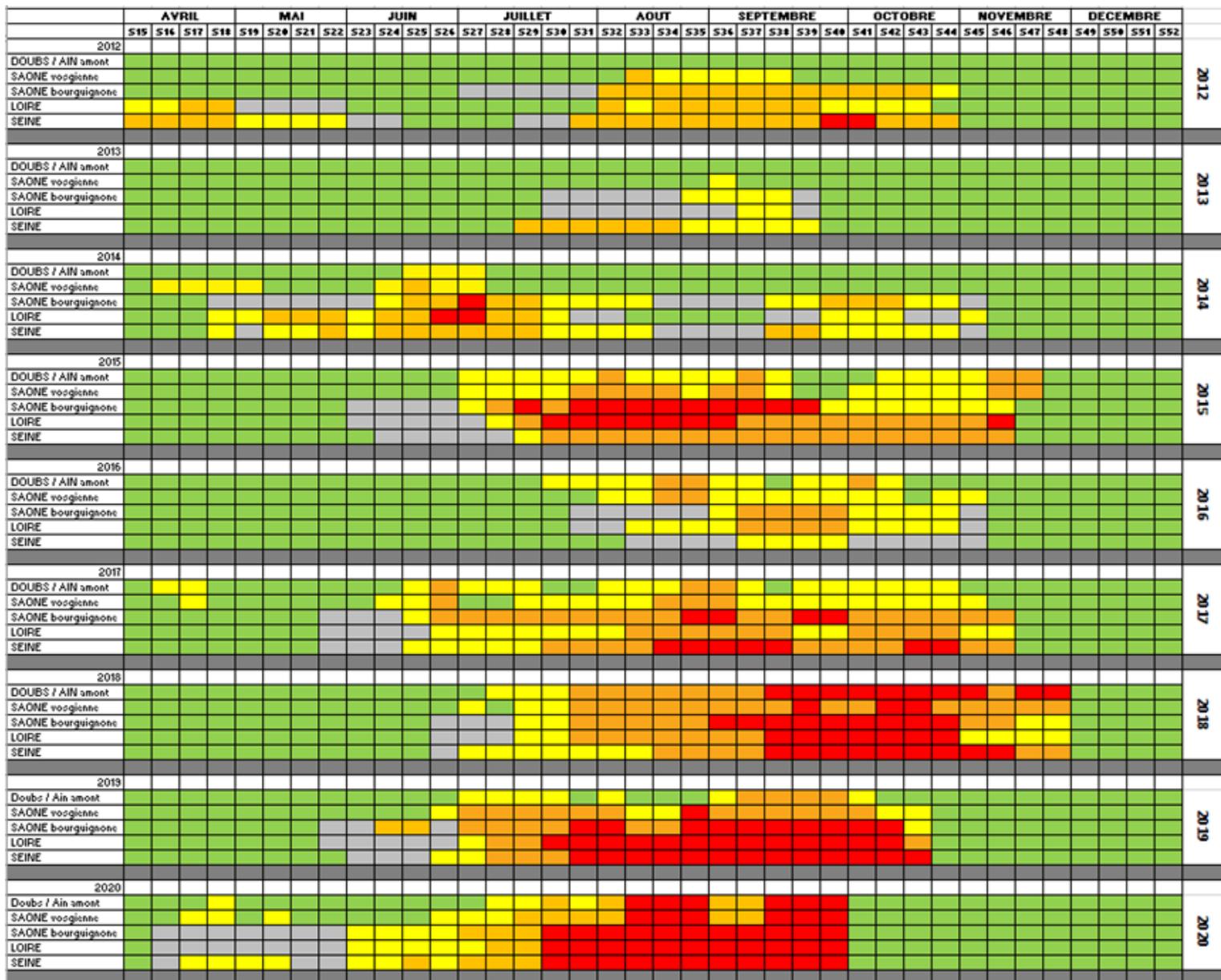


Figure 23 : Représentation des cycles hydrologiques par le débit mesuré sur la station de Rigny-sur-Arroux dans la période 2010/2011.

A partir de la figure 23, on peut observer des dépassements spécifiques sur certaines stations durant les années 2010 à 2012. Après plusieurs années de faibles concentrations, des dépassements sont à nouveau observés à partir de l'année 2018, se poursuivant en 2019 et 2020 avec toutefois une diminution graduelle d'année en année. Cette détérioration récente et subite de la qualité des eaux coïncide avec des événements de sécheresses prolongées en période estivale, celles-ci s'étendant jusqu'en période automnale.

Nous allons, par la suite, développer sur les observations de détériorations identifiées depuis l'année 2018 sur la qualité de l'eau et essayer de faire le lien en fonction des mesures climatiques.



Légende : Gris : Absence de donnée - Vert : Période normale - Jaune : Alerte - Orange : Alerte renforcée - Rouge : Crise.

Figure 24 : Débits des rivières et sécheresses par grand bassin de la région depuis 2012. Source : "Rapport Gestion quantitative de la ressource en eau en Bourgogne Franche-Comté" - ARS Bourgogne Franche-Comté

La figure 24 ci-dessus illustre différentes périodes sur l'aspect quantitatif de l'eau disponible dans les rivières de la région.

On peut observer sur la figure 24, une augmentation de périodes d'alertes ou de crises à partir de l'année 2018, ceci exprimant des périodes de sécheresses plus longues et plus intenses. Le rapport de la DREAL de février 2021, émet une hypothèse sur l'impact des sécheresses sur la source des concentrations observées. Notamment lorsque l'azote minéralisé n'est pas autant mobilisé par la végétation en période sèche, causant ainsi une plus grande quantité relarguée lors d'épisodes pluvieux.

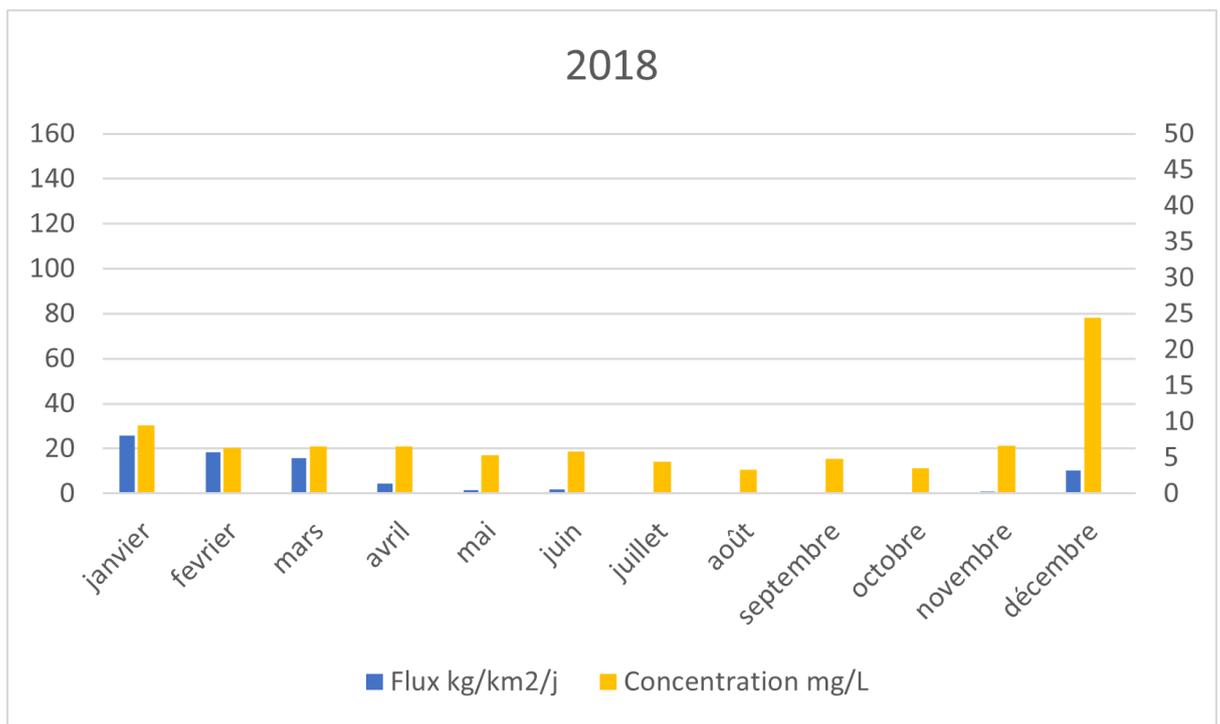
Des travaux de modélisation de l'impact du changement climatique sur les transferts de nitrates vers les masses d'eau sur le 21ème siècle (Taras E. Lychuk et al., 2021), montrent que le changement climatique a et aura un impact majeur sur les pertes de nitrates par lessivage et ruissellement

principalement. Ces travaux montrent notamment que l'intensification de la fréquence d'événements météorologiques extrêmes tels que des canicules, ou des périodes de précipitations intenses, seront des facteurs déterminants de la dégradation de la qualité des eaux vis-à-vis du critère nitrates. Ces événements affecteraient négativement la capacité des plantes à récupérer les nitrates présents dans les sols et provoqueraient donc un relargage plus intense.

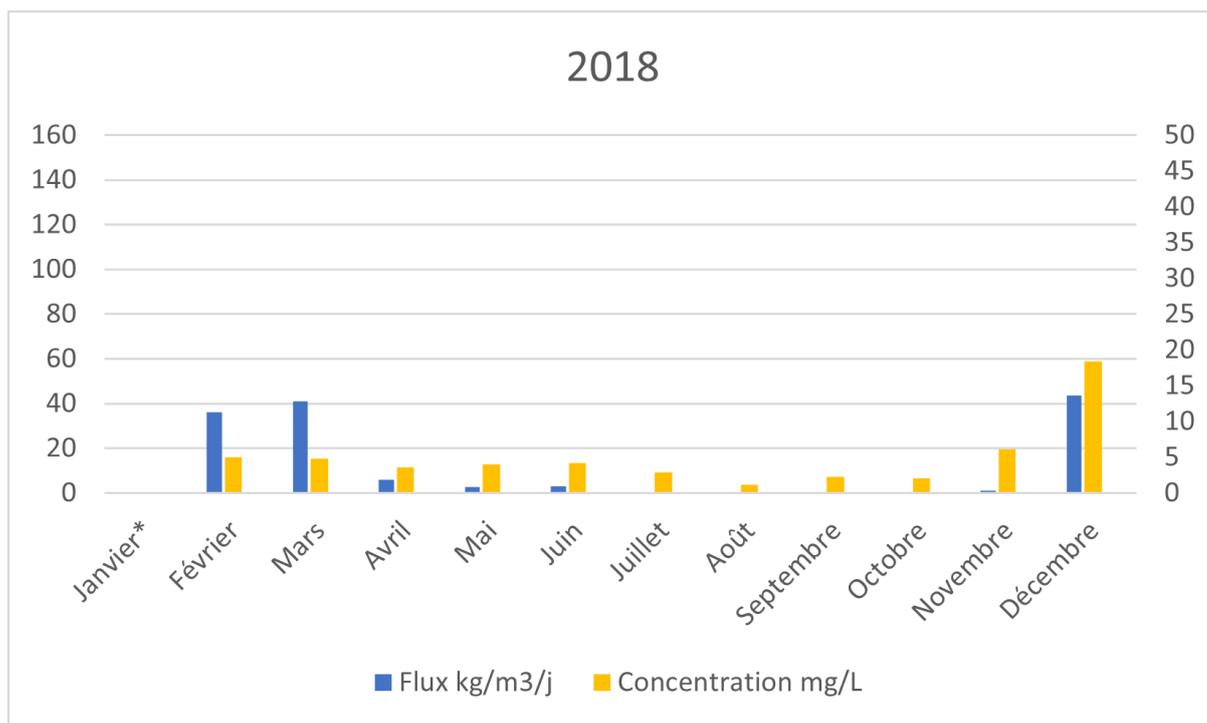
Cette étude américaine conclut qu'une utilisation plus importante de plantes C4, donc plus adaptées à des zones au climats plus secs et/ou avec de fortes précipitations, peut permettre de réduire le relargage des nitrates.

L'étude des flux de nitrates permet d'analyser la quantité de nitrates transférée par bassin versant ou par période.

(A)



(B)



(C)

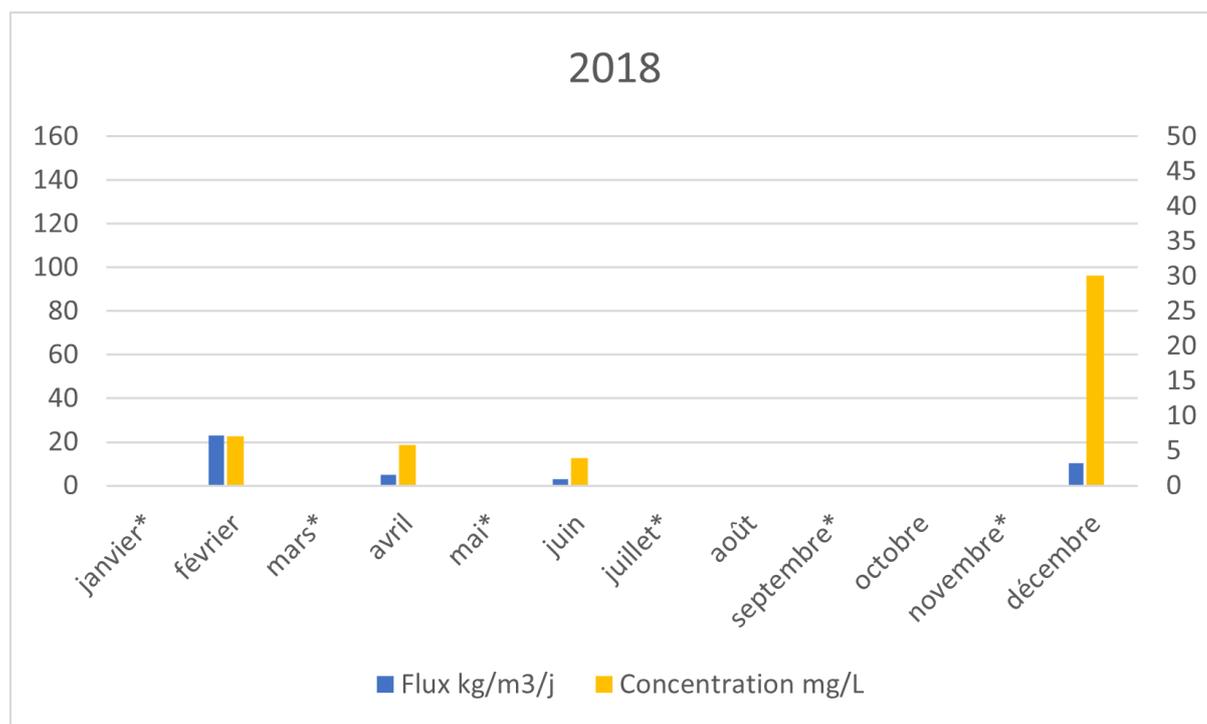
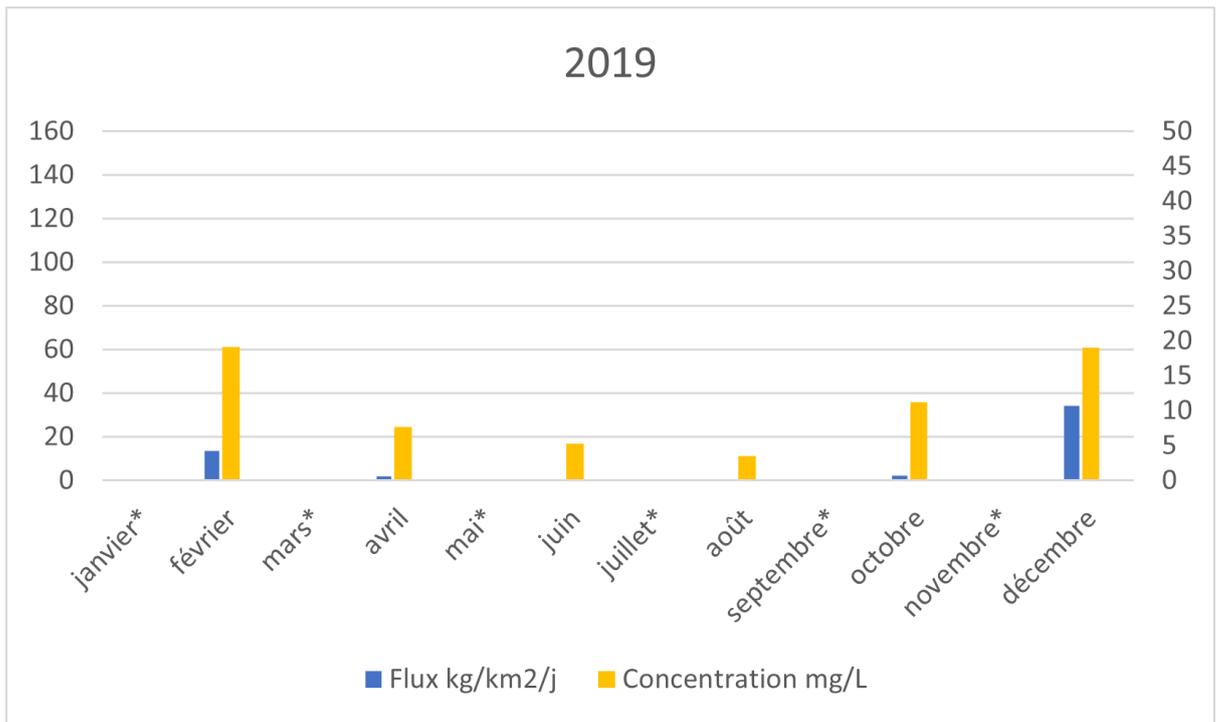
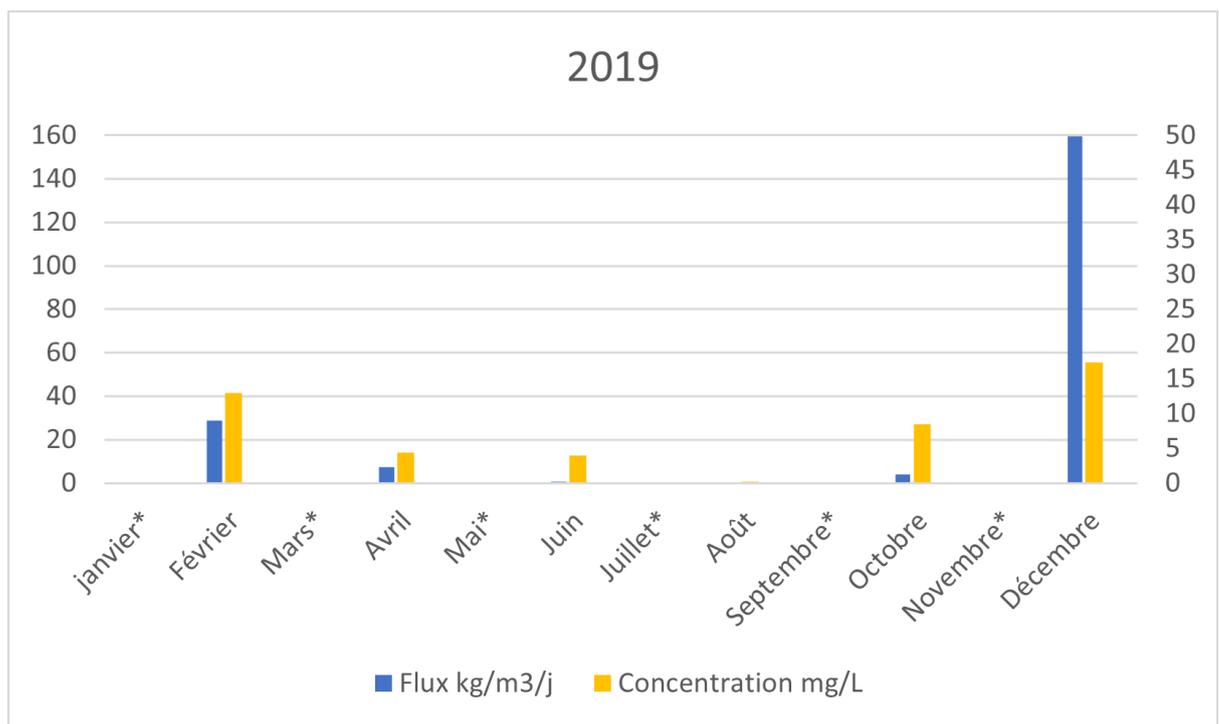


Figure 25 : Histogrammes comparatifs entre flux en kg/km²/j (bleu) et concentration en mg/L (orange) des valeurs uniques mensuelles de nitrates mesurés sur les stations de Vitry-en-Charollais sur la Bourbince (A), Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux (B) et Poisson sur l'Arconce (C) de l'année 2018 - (*) = Mois sans données. Sources : Banque Naiades et Hydro France

(A)



(B)



(C)

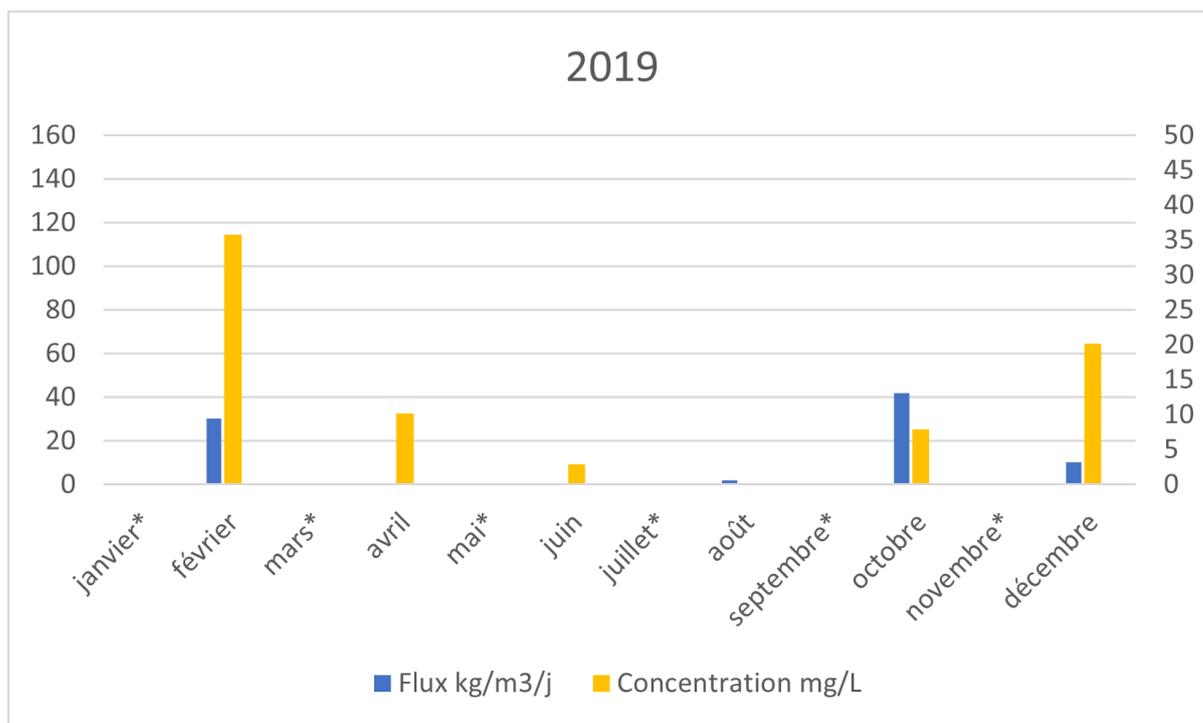
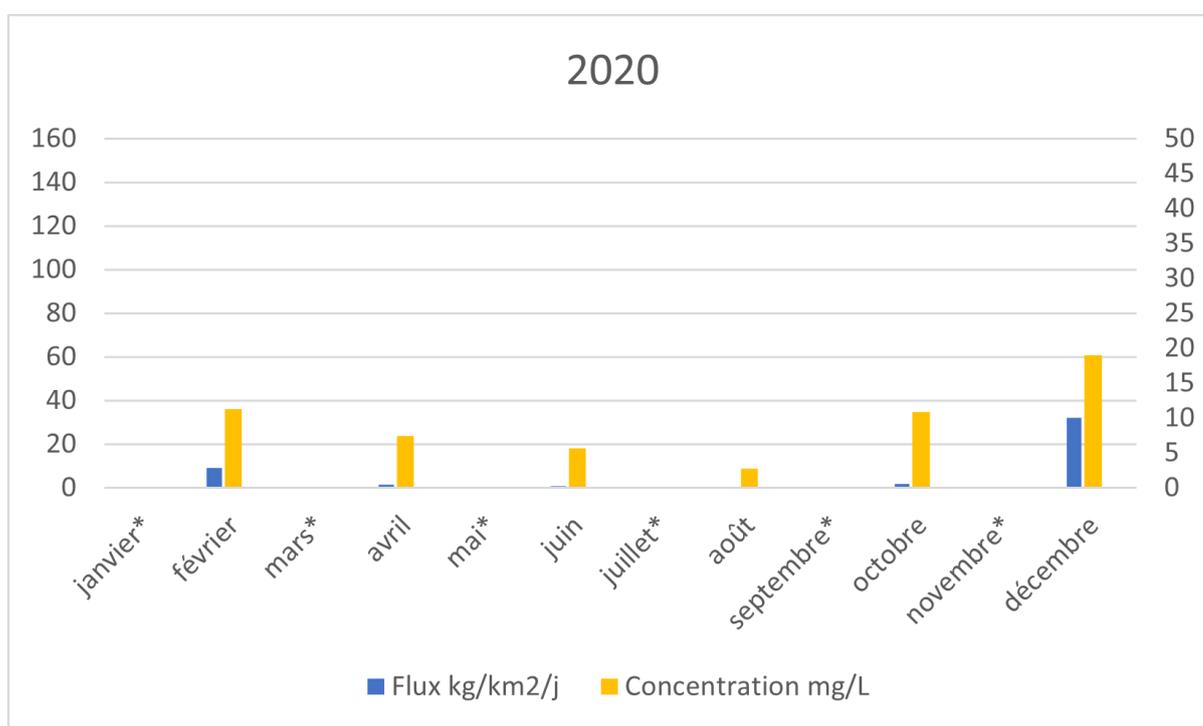
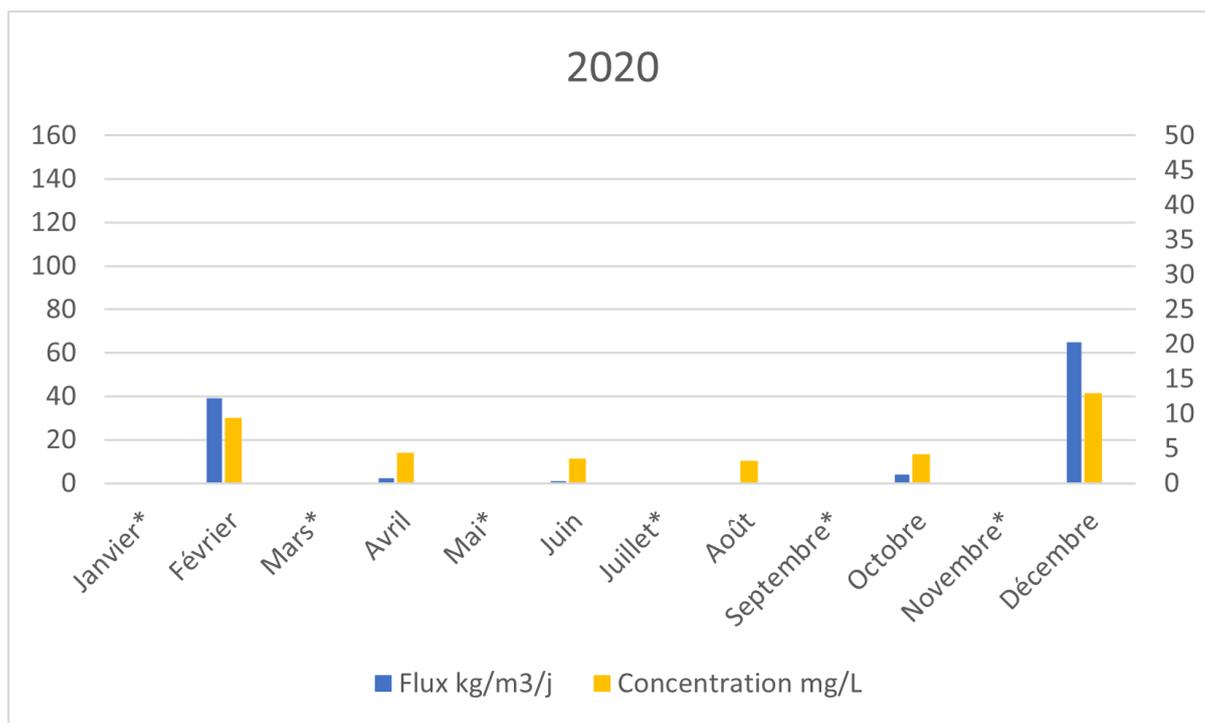


Figure 26 : Histogrammes comparatifs entre flux en kg/km²/j (bleu) et concentration en mg/L (orange) des valeurs uniques mensuelles de nitrates mesurés sur les stations de Vitry-en-Charollais sur la Bourbince (A), Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux (B) et Poisson sur l'Arconce (C) de l'année 2019 - (*) = Mois sans données. Sources : Banque Naiades et Hydro France

(A)



(B)



(C)

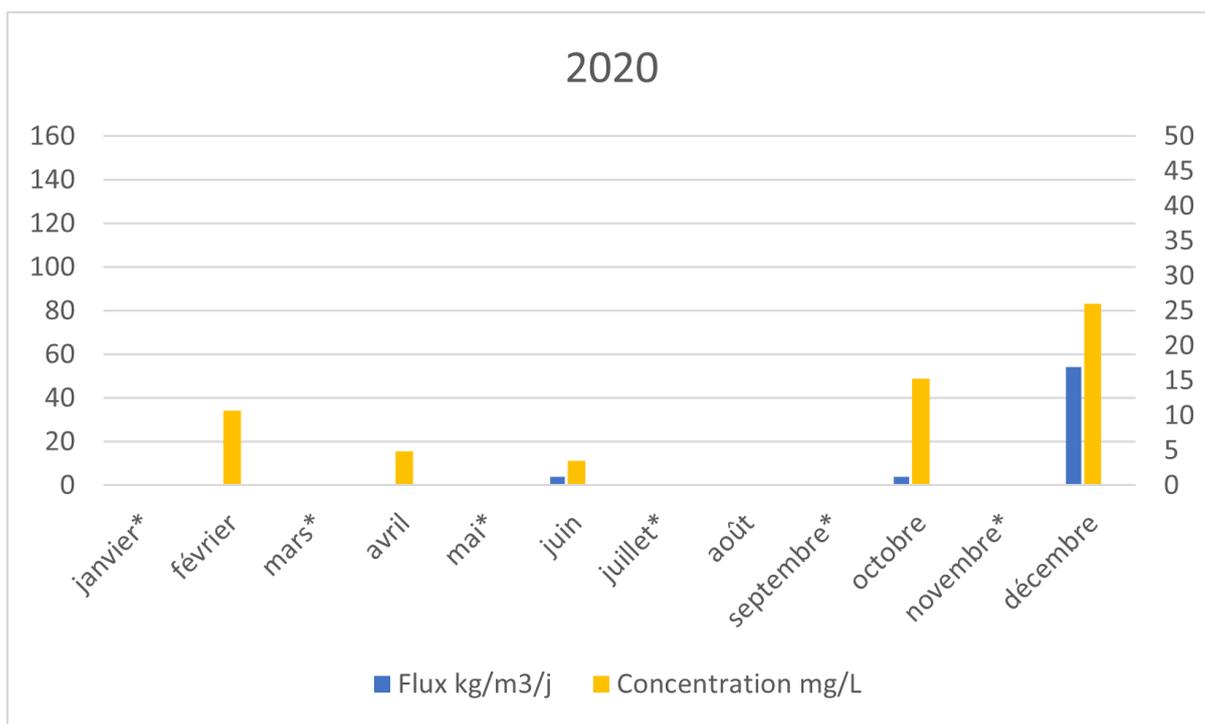


Figure 27 : Histogrammes comparatifs entre flux en kg/km²/j (bleu) et concentration en mg/L (orange) des valeurs uniques mensuelles de nitrates mesurés sur les stations de Vitry-en-Charollais sur la Bourbince (A), Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux (B) et Poisson sur l'Arconce (C) de l'année 2020 - (*) = Mois sans données. Sources : Banque Naiades et Hydro France

Sur les Figures 25, 26 et 27, une comparaison entre concentration et flux a été faite pour les stations de Vitry-en-Charollais, Rigny-sur-Arroux et Poisson, afin de déterminer si au sein de ces 3 bassins versants, des phénomènes distincts se dessinent tel que des phénomènes de dilutions par exemple.

Une dilution va se manifester dans une situation où la quantité d'eau mesurée par le débit dépasse largement le débit nécessaire pour emporter la totalité ou quasi-totalité des nitrates exportables par les précipitations. On peut observer ce phénomène par exemple durant le mois de décembre 2019 à Rigny-sur-Arroux (Figure 26, B), où l'on observe le flux le plus élevé de l'année tandis que la concentration ne s'élève que très peu par rapport aux autres valeurs mesurées cette année. En résumé, à ce moment-là, cette concentration observée ne se distingue pas car le débit dilue cette concentration, relative à la masse transportée.

A l'inverse des phénomènes de dilutions, on peut aussi observer des périodes de concentrations élevées avec des flux faibles. Cela est visible principalement sur les stations de Vitry-en-Charollais et Poisson, surtout en 2018 (Figure 25). En décembre, les concentrations augmentent par rapport au reste de l'année, tandis que le flux n'évolue que très peu par rapport aux autres valeurs de l'année. Dans cette situation, le débit est peu élevé. On se retrouve fréquemment dans une situation où une grande part des nitrates ne sont pas mobilisés par l'eau et se retrouve stockée dans les sols.

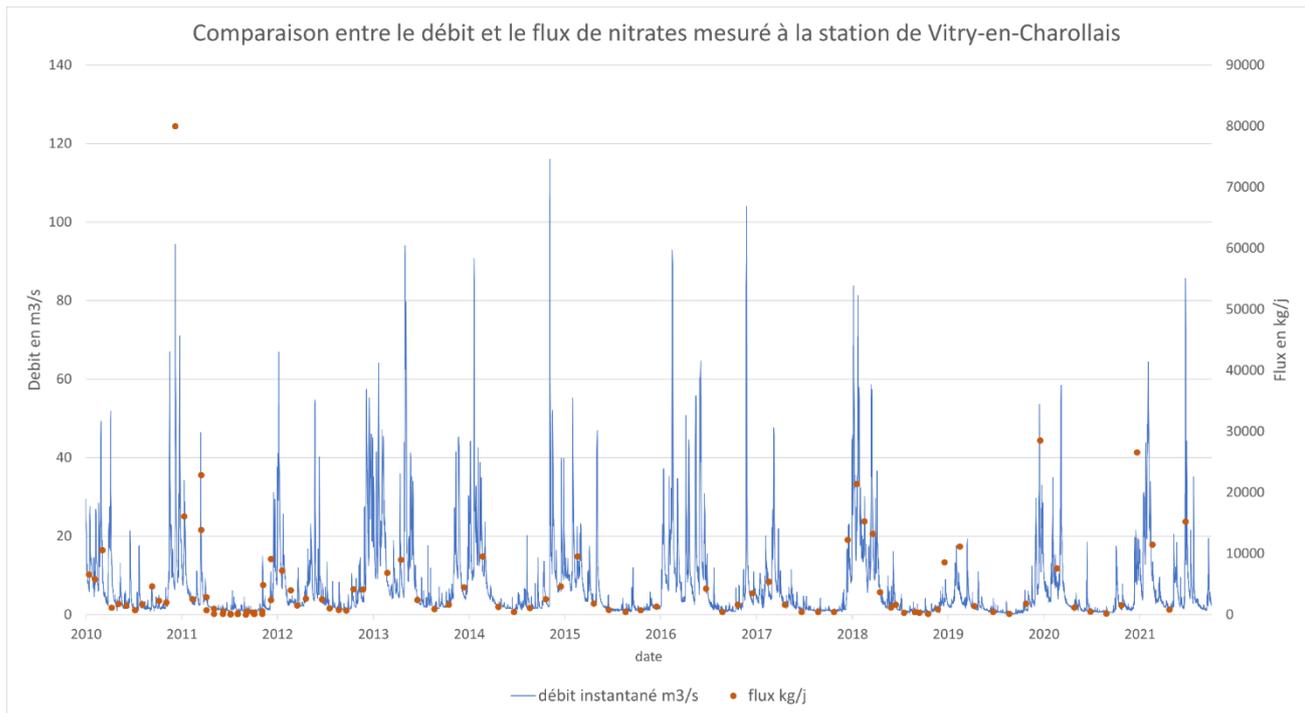
D'après les données de concentrations (Figure 25, 26, 27), les pics majoritairement mesurés se trouvent dans la période de décembre 2018 à janvier 2019. Or d'après les flux correspondant à ces périodes, les quantités transportées ne dépassent pas plus que les autres années, on a donc un effet de concentration, où un pourcentage élevé de nitrates est transporté par un faible débit.

D'après les données de concentrations (Figure 25, 26, 27), les mois où l'on retrouve une grande différence entre flux et concentration mesurée sont principalement en décembre 2018 et février 2019. On aurait donc pour cette période-là, des phénomènes de concentration, pour laquelle un pourcentage élevé de nitrates disponibles, sont transportés par des débits faibles.

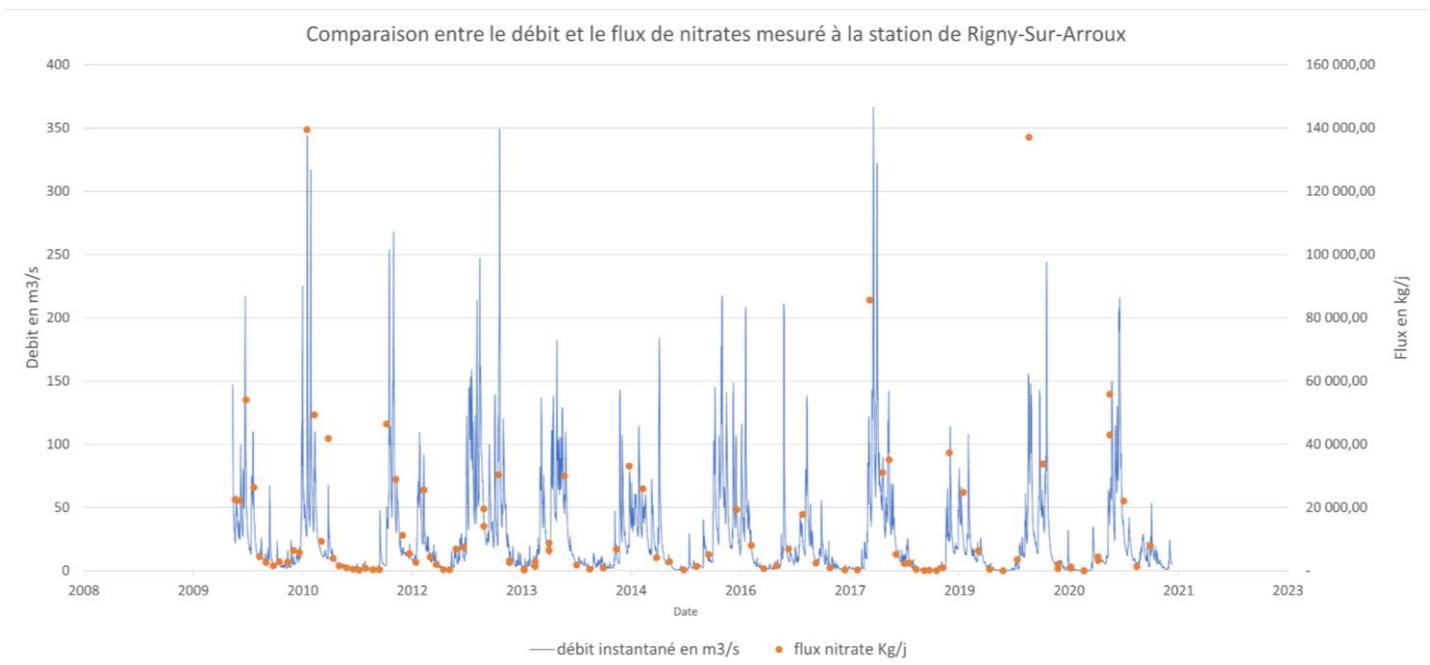
D'après la figure 25, l'année 2018 est celle qui est caractérisée par une période très longue de sécheresse, en particulier s'étendant jusqu'à très tard dans l'année (octobre/novembre). Les observations faites sur la période de décembre 2018 à février 2019 semblent donc corroborer avec l'hypothèse soulevée lors de la rédaction du rapport de 2021, où des sécheresses prolongées auraient un impact majeur sur la problématique des nitrates étudiée.

Par la suite nous allons essayer de discerner deux périodes par rapport aux valeurs de flux calculées, afin de déterminer si par le calcul des flux, une différence entre la période sèche de 2018 à 2020 se dessine par rapport aux années précédant 2018.

(A)



(B)



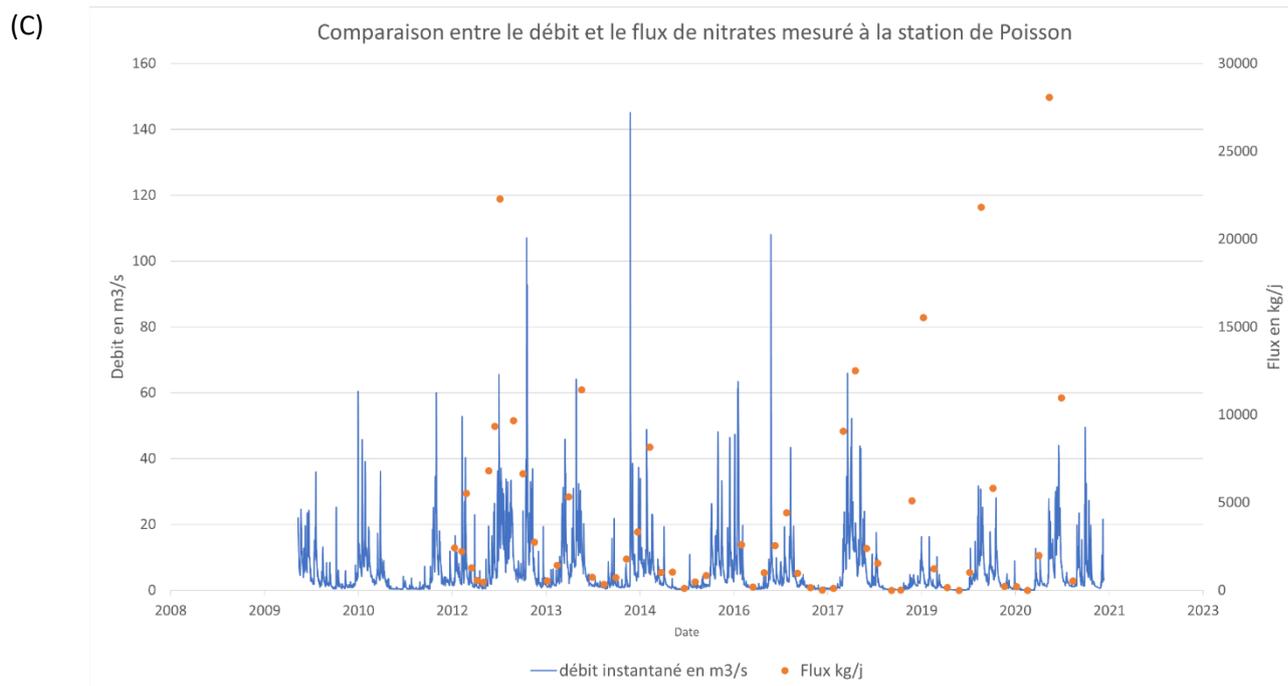


Figure 28 : Graphiques de comparaison entre le débit et le flux de nitrates sur les trois stations Vitry-en-Charollais (A), Rigny-sur-Arroux (B) et Poisson (C), séparée en année civile. Sources : Banque Naiades et Hydro France

La figure 28 montre les variations du débit journalier et des flux en nitrates calculés de 2010 à 2020.

On peut observer deux tendances se dessiner, avec une transition autour de l'année 2017, particulièrement pour la station de Poisson (Figure 28, C). Dans la période post-2017, une part des flux calculés se retrouvent nettement plus haut alors que le débit ne varie pas significativement, comparé à la période précédant 2017. Visuellement on voit un écart de hauteur plus élevé entre débit et flux après 2017.

Cette différence pourrait indiquer par exemple une différence dans la proportion ou masse de nitrates étant transportés en fonction du débit. Ce qui a été expliqué précédemment indiquerait donc qu'à un débit fixe, la masse de nitrates transportée avant 2017 serait en général plus faible qu'après 2017. Cependant, les flux de nitrates de la période 2010-2017 ne semblent pas significativement différents des flux de 2017-2021 (Test statistique Wilcoxon, p-value > 0,05 dans l'hypothèse où les deux périodes sont significativement différentes).

La distribution des échantillons de flux par rapport aux variations de débit peut cependant créer un biais. En effet, sur ces stations la majeure partie des données recueillies correspondent à des périodes d'étiages ou de débits modérés. Une dispersion plus variée serait plus optimale afin de déterminer statistiquement si des périodes de transports différents se dessinent. Cette question sera plus amplement discutée par la suite.

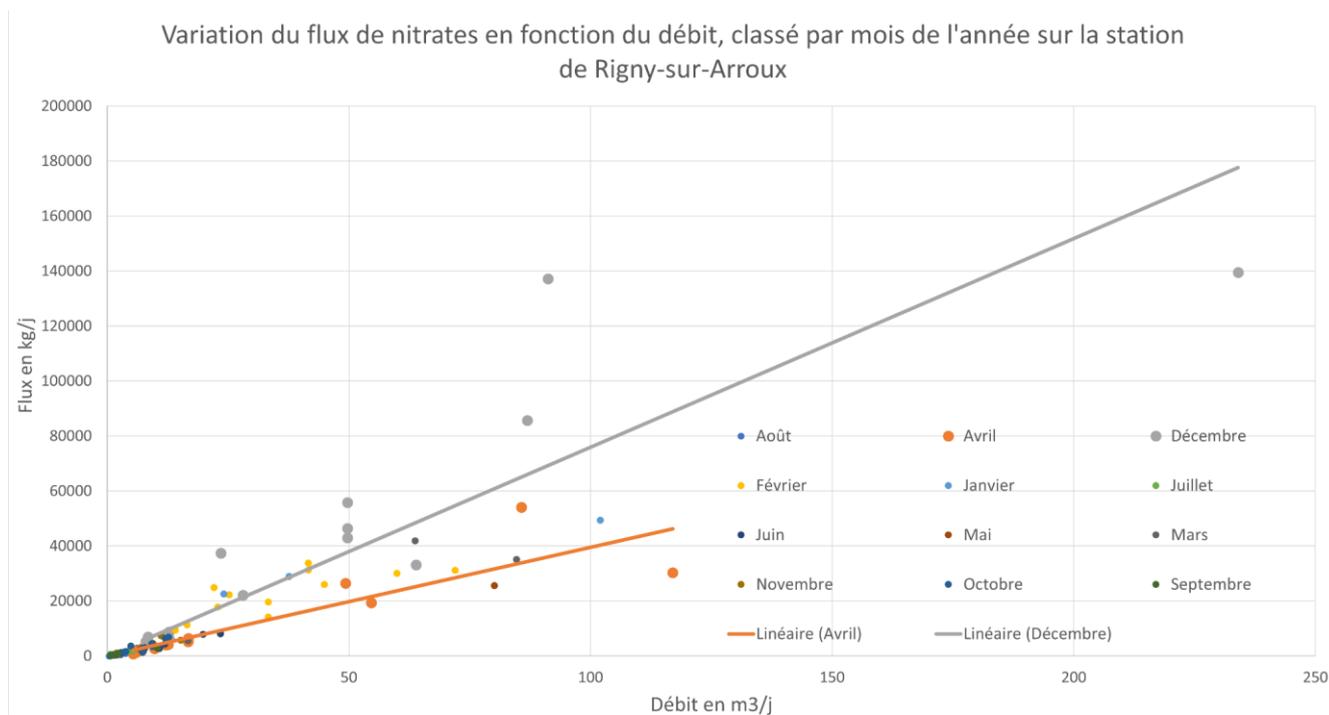


Figure 29 : Variation du flux de nitrates en fonction du débit et la date de prélèvement sur la station de Rigny-sur-Arroux.
Sources : Banque Naiades et Hydro France

On cherche ici à déterminer si différentes périodes sur le cycle des nitrates peuvent se distinguer avec l'aide du calcul des flux (Figure 29).

Le choix de décembre est représentatif du début de cycle hydrologique avec donc une période d'apport d'eau par les précipitations. Le mois d'avril représente une période de débit plus faible, avec cependant aussi une particularité concernant les épandages. Il s'agit d'une période où des apports sont présents. On représente ici deux périodes du cycle hydrologique bien distinctes.

Le graphique des variations du flux de nitrates (Figure 29) compile les valeurs de flux et débit depuis 2010 sur la station de Rigny-sur-Arroux située sur le cours de l'Arroux. Les valeurs des deux autres stations ne sont pas représentées ici, car les résultats sont similaires.

Les données compilées ici sont classées mensuellement. On peut par exemple essayer de déterminer si à partir des valeurs présentes, il est possible de dessiner et catégoriser statistiquement des groupes par périodes de l'année.

On observe que le flux de nitrates augmente avec le débit peu importe la saison, cependant ce que l'on cherche à déterminer, c'est si cette augmentation varie par rapport à certaines périodes de l'année, ici en fonction des mois de l'année.

D'après les tests statistiques effectués (test de Fischer), avec le jeu de données présent, il est difficile de faire une comparaison robuste, car la variance est relativement différente et le nombre de données faibles. On peut toutefois essayer d'appliquer un test statistique non paramétrique. En appliquant un test de Wilcoxon sur les deux mois. La p-valeur obtenue inférieure au seuil de 0,05, on peut donc conserver l'hypothèse que les deux jeux de données sont significativement différents. Cela nous indiquerait donc que des régimes différents se dessinent, du moins sur ces deux mois spécifiques et sur cette station. Par ailleurs, le mois de janvier montre des valeurs faibles de flux (Figure 29), alors qu'à cette période les flux attendus de nitrates sont censés être élevés. Cela peut être expliqué par la succession des crues sur le bassin versant, où les nitrates restants après la première crue majeure du cycle sont beaucoup moins mobilisables par l'eau.

Il faut cependant souligner que les conditions présentées ici, permettent mal de confirmer l'hypothèse soulevée. En effet, se restreindre à seulement deux mois bien spécifiques au cours des années peut générer des biais en raison du faible nombre de valeurs. Le jeu de données est clairement insuffisant pour l'analyse des variations saisonnières. Des mesures des débits et des concentrations en nitrates hebdomadaires, éventuellement bimensuelles seraient nécessaires.

Par exemple, lorsque l'on souhaite étudier un mois spécifique ou comparer différents mois au sein d'une année, si une seule mesure a été effectuée dans chaque mois mais que ces mesures sont faites dans des périodes de débits bien différentes, les analyses qui ressortent ne seront pas exploitables. En parallèle de la relative faible fréquence de mesures, la majorité des mesures faites ne sont pas synchronisées temporellement. Cette différence empêche toute étude spécifique à des événements ponctuels à l'échelle d'une journée voire parfois d'une plus longue période.

Cela nous amène à la suite concernant le complément d'étude.

En effet, les conditions requises pour que l'azote se minéralise sont généralement réunies pendant les périodes automnales (Tournebize et al, 2008). Les sécheresses vont à leur tour entraîner une diminution de la part d'azote prélevée par les plantes et donc une augmentation de la part non prélevée. Ainsi, l'augmentation des flux d'eau en entrée d'hiver va entraîner l'exportation d'une importante quantité d'azote minéralisée. C'est la période de drainage intense et correspond généralement à des périodes de crue où plus de 50% des flux d'azote sont exportés. La concentration moyenne annuelle est contrôlée par cette phase. Les flux seront donc plus faibles pour les prochaines périodes de l'année.

3. Limites

L'analyse des variations saisonnières des concentrations et de flux de nitrates qui vient d'être réalisée conduit à des résultats peu robustes en raison de la faible densité temporelle du jeu de données. La fréquence de mesure des concentrations de nitrates au niveau des stations est trop faible.

Le calcul des flux ne nous permet d'étudier que 3 stations parmi les 8 mesurant les concentrations de nitrates car, seulement 3 coïncident ou sont situées à proximité d'une station mesurant le débit. Cette réduction de nombre d'échantillons réduit grandement l'amplitude d'observations possibles sur différents paramètres.

Ce qui ressort globalement des dernières observations qui complètent le premier rapport de la DREAL, est que des taux élevés en nitrates sont toujours observés mais à moindre mesure, tout en indiquant une amélioration globale surtout en 2020. L'année 2021, étant une année relativement proche des normales climatiques, il serait intéressant de se pencher sur les valeurs obtenues à la fin de l'année hydrologique, afin de voir si les concentrations se stabilisent rapidement à des valeurs proches de celles observées avant 2017.

4. Cas particulier de Vendennes sur Arroux

Le cas particulier, présenté ci-dessous, nous servira d'exemple de gestion des pollutions au nitrate à l'échelle d'une alimentation en eau potable pour une commune, comme Vendennes sur Arroux. Cependant en vue du temps restreint pour la réalisation de l'étude et de la faible quantité de jeux de données exploitables, notre étude restera donc superficielle mais mériterait un approfondissement ultérieur.

La commune de Vendennes sur Arroux est située dans le département de la Saône-et-Loire ayant une superficie 16,09 km². Elle se situe sur un bassin versant Loire-Bretagne de 210 hectares, plus précisément sur les communes de Vendennes sur Arroux et Marly sur Arroux avec une SAU (Surface Agricole Utile) de 187 hectares, majoritairement des prairies. Cette commune est entourée de la rivière de l'Arroux. Sur cette commune, deux puits de captages d'eau sont placés sur la nappe alluviale de l'Arroux, ce qui représente 40% de l'apport en eau potable.

Concernant le cas particulier présenté ici, la commune a été contrainte à l'échelle de son bassin versant de mettre en place des réglementations pour les concentrations en nitrates et produits phytosanitaires. En effet l'augmentation des concentrations en nitrates serait influencée par les trois années de sécheresse (limitant la minéralisation des éléments azotés), l'augmentation de la surface agricole en culture, le retournement des prairies rendant les nitrates disponibles aux lessivages (*Sophie Lapointe-Simonet-2021*).

Ainsi, les deux captages, présents sur la commune, ont été classés dans le cadre des schémas directeurs d'aménagement et gestion des eaux (SDAGE 2010-2015) comme "Captage prioritaire Grenelle". Cela correspond à 500 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses ont été identifiés pour des problématiques de dépassements des seuils autorisés en nitrates ou en phytosanitaires, ou pour le cumul des deux dans certains cas. Ces captages ont été identifié selon le processus de concertation locale et à partir de trois critères (*Aires d'alimentation de captages de ressources techniques et réseaux d'acteurs-2017*) ;

- Etat de la ressource vis à vis des pollutions par les nitrates et les pesticides
- Caractère stratégique de la ressource au vu de la population desservie
- Volonté de reconquérir certains captages abandonnés

En 2015, un programme d'action a été mis en place avec comme objectif global sur l'ensemble des ouvrages fixés à 20 mg/L maximum de teneur moyenne en nitrates sur l'ensemble des captages. De plus, par ouvrage il ne faut pas dépasser 35 mg/L, en cas de pics de concentration en nitrates.

L'objectif de réduction des nitrates dans les eaux est en moyenne atteint avant 2020. A partir de 2020, le seuil de concentration en nitrate est dépassé sur les deux captages de Vendennes sur Arroux principalement à partir du mois de septembre.

D'après les résultats obtenus sur les captages d'eau potable ainsi que les résultats obtenus dans notre étude, nous pouvons dire que l'augmentation des concentrations en nitrates à partir de septembre 2020 peut être dû à :

- La perte par lessivage des nitrates (faible mobilisation des nitrates par les plantes lors des périodes de sécheresse)
- Le ressuyage des sol épais, libérant une quantité de nitrates importante
- Des sols qui sont davantage nus, limitant l'absorption des nitrates par les plantes

5. Pistes d'expérimentation

À la suite de notre étude nous pouvons présenter plusieurs pistes d'expérimentations. Sur la zone d'étude du Charolais-Brionnais, nous avons pu constater que l'apport en nitrates dans l'environnement était principalement induit par apport anthropique, mais également accentué par des facteurs physico-chimiques du sol, de l'eau et du climat. Nous avons essayé de déterminer sur quels paramètres nous pouvons exercer une influence.

Il serait intéressant de mettre en place un suivi en continu qualitatif et quantitatif des masses d'eau de la zone, avec une prise de mesures fréquentes. Plus précisément, cela impliquerait plusieurs prélèvements par jour sur une période de crue, où le débit peut varier significativement au cours d'une même journée. Les concentrations en nitrates et les valeurs du débit du cours d'eau étudié sont principalement les plus intéressantes. D'autres paramètres peuvent être aussi mesurés, globalement il est nécessaire d'avoir plus de données qualitatives et quantitatives du cours d'eau afin d'avoir un regard plus complet.

Nous pouvons aussi supposer que dans certaines conditions les flux de nitrates soient émis par des rejets domestiques. C'est pourquoi, il serait intéressant de recenser le nombre de stations de traitement des eaux usées de la zone d'étude, afin d'effectuer un contrôle de la qualité de l'eau en sortie d'installation, mais également des possibles dysfonctionnements. Cette étude permettrait d'observer le relargage de pollution dans le milieu naturel et ses impacts.

La carte de réserve utile pourra être complétée à l'avenir en utilisant les calculs mentionnés sous la Figure 12, en utilisant cette fois les données de profondeur de sol l'Allier.

Il serait également intéressant de réaliser des simulations d'évolution de bilan hydrique selon la méthode de calcul de Jacquart et Choissel (1995) sur des données à partir des années 2000 jusqu'à 2050 (données modélisées disponibles sur DRIAS) par exemple. Pour chaque UCS serait attribuer le centre de maille le plus proche. Cela permettrait d'avoir une idée des lames d'eau drainées, de voir si elle évolue dans le temps, si elle a diminué ces dernières années, si ce sont toujours les mêmes zones qui participent à la recharge des nappes.

Sinon plus simplement, sélectionner deux solutions de sols de la zone d'étude qui ont des réserves utiles différentes, et voir les concentrations en nitrates retrouvées après une année humide et une année sèche, permettant de mieux comprendre les sols qui contribuent à la pollution en nitrates et selon quelles conditions. Il serait également intéressant de mesurer les concentrations en nitrates, sur un cours d'eau d'un petit bassin versant, car l'inertie observée sur ces cours d'eau est moins forte, ce qui permettrait d'avoir un suivi plus instantané et précis, face à la problématique de la qualité de l'eau.

De plus, d'après la littérature scientifique, nous avons pu déterminer que la présence de zone humide sur une zone sensible au Nitrate permettait de réduire les transferts de nitrate dans le milieu grâce à une alternance anaérobie/aérobie. Ainsi, il serait profitable de recenser l'ensemble des zones humides présentes sur le territoire du Charolais-Brionnais ainsi que d'effectuer un contrôle de ces dernières en évaluant leur fonctionnement. De plus, si nécessaire, il serait intéressant de mettre en place des projets de remise en état afin que les zones humides réalisent leurs fonctions hydrologiques et écologiques (*Évaluation environnementale du 6ème programme d'actions régional Bourgogne-Franche-Comté intervenu en application de la directive 91/676 CEE dite "directive nitrate" du 12 décembre 1991*).

Avec un suivi de l'ensemble des paramètres pouvant influencer les concentrations en nitrates dans l'environnement, une quantification précise des concentrations de nitrates et l'entretien des zones de traitement naturelle, comme les zones humides présentées ci-dessus, une meilleure influence sur la gestion des nitrates dans la zone du Charolais- Brionnais serait possible.

Conclusion

À la suite de l'étude menée par la DREAL en février 2021, ce rapport a été réalisé pour répondre aux différents objectifs et approfondir les connaissances sur les interactions entre le changement climatique, l'évolution des pratiques agricoles et la dynamique des concentrations en nitrates dans les masses d'eau superficielles.

Dans ce rapport nous avons étudié les paramètres pouvant influencer les nitrates sur la zone d'étude du Charolais-Brionnais en caractérisant la zone du point de vue du paysage et de ses empreintes anthropiques, ainsi que des sols et de leurs caractéristiques. Par la suite nous avons effectué un complément du rapport de février 2021 produit par la DREAL, principalement sur la qualité des eaux de surfaces sur les 8 bassins versants étudiés.

Grâce à cette étude nous avons pu mettre en lumière des paramètres susceptibles de jouer un rôle dans la contamination par les nitrates des masses d'eaux superficielles. Les zones ayant pour caractéristiques une occupation par des vaches laitières, des sols appartenant aux familles de sols à tendance d'excès d'eau, des grandes épaisseurs et réserves utiles et étant en période d'année "sèche", seront plus propices à un fort taux de nitrates dans les cours d'eau. Il est important de noter que ces paramètres peuvent jouer un rôle, mais ne sont en aucun cas totalement responsables d'une forte pollution des eaux en nitrates. De nombreux paramètres sont également à prendre en compte, tels que la température, la teneur en matière organique du sol, le pH, l'humidité, etc...

Concernant l'étude de la qualité de l'eau sur les bassins versants, les données disponibles permettent de supposer que la qualité de l'eau s'améliore en 2020 avec la réduction des périodes de sécheresse. Néanmoins, les observations de détériorations rapides et intenses de la qualité des cours d'eau semblent indiquer une forte sensibilité aux changements climatiques. Cependant, il est encore difficile d'avoir une analyse fine de ces paramètres avec la fréquence de données disponibles (permettant d'obtenir les concentrations de nitrates) et le nombre de stations mesurant le débit (permettant les calculs de flux).

C'est pourquoi, il serait intéressant de mettre en place des campagnes de mesures davantage régulières sur les masses d'eaux superficielles, mais également sur les solutions du sol, afin d'obtenir des jeux de données exploitables sur plusieurs années. De plus, d'autres paramètres pouvant influencer les concentrations en nitrates dans l'environnement méritent notre attention, comme le dysfonctionnement ou rejets accidentels de certaines stations de traitement des eaux. Par ailleurs, un recensement des zones humides sur la zone d'étude et leur état seraient des paramètres à étudier pour limiter l'avancement des nitrates dans l'environnement.

Bibliographie

Aires d'alimentation de captages de ressources techniques et réseaux d'acteurs-2017 <https://aires-captages.fr/page/contexte-reglementaire>

Agriculture et territoire- aire d'alimentation des captages de Venderesses sur Arroux - Sophie Lapointe-Simonet-2021

A. N'Dayegamiye - Université de Laval – 2005 - "Minéralisation de l'azote et du phosphore dans les sols organiques cultivés du Sud-Ouest du Québec"

Arrêtés préfectoraux concernant les captages prioritaires Etat- Juin 2017 - "seine-maritime.agriculture.gouv.fr"

A, Sauvesty et G. Gendron- 1 juillet 1989 - « INFLUENCE DU CLIMAT SUR L'ACTIVITÉ NITRATE RÉDUCTASE AU COURS DU DÉVELOPPEMENT DE SIX VARIÉTÉS D'AVOINE ». *Canadian Journal of Plant Science* 69, no 3: 919-23. <https://doi.org/10.4141/cjps89-110>.

Benoit, Marie, 2014, « Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières : Lixiviation et émissions atmosphériques dans des systèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine (France) », s. d., 177.

Benoit. M et Veysset. P, 2021, *Calcul des Unités Gros Bétaux : proposition d'une méthode basée sur les besoins énergétiques pour affiner l'étude des systèmes d'élevage*, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4855>

Bruand, A., Duval, O., & Cousin, I., 2004, *Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente*. *Etude et gestion des Sols*, 11(3), 3-323.

Burel, Enguerrand, 2018 « Modélisation des hétérogénéités de la réserve utile et du développement des cultures au sein d'un sous-bassin versant en Midi-Pyrénées », s. d., 303.

C. Charlot et T. Virely- 2019 - "Diagnostic agraire dans la petite région agricole du Brionnais, Saône-et-Loire, France"

Cheloufi, Hamid, et Fernand Jacquin, 2003, « Influence of the soil climate on the evolution of the nitrogenous compounds in the soils of Lorraine and their consequences on the water quality », s. d., 21.

C. Juste, J. Tauzin, P. Dureau, et C. Courpron, 1982, « Exportation des éléments fertilisants par lessivage en sol sableux des Landes de Gascogne. Résultats de 8 années d'observations en cases lysimétriques ». *Agronomie* 2, no 1 : 91-98. <https://doi.org/10.1051/agro:19820112>.

Commission européenne - Janvier 2020 - "La directive nitrate de l'UE"

Consultations publiques - <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/decret-relatif-a-la-contribution-a-la-gestion-et-a2190.html>

Corine Land Cover - Occupation des sols en France - 2006- -

<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-occupation-des-sols-en-france/>

Cycle de l'eau dans les sols :

<http://www.observatoire-environnement.org/Le-cycle-de-l-eau-dans-le-sol.html>

Dossier de candidature à l'inscription sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco - Avril 2019 - "Le Charolais-Brionnais, paysage culturel de l'élevage bovin"

DREAL BFC et DRAAF BFC- 2021- "Les mesures du 6ème programme d'Actions Nitrates dans les zones vulnérables de Bourgogne Franche-Comté"

EPAB - Bilan 2016 - Flux de nitrates en baie de Douarnenez

European Commission, Directorate General for the Environment, 2014, La Directive-cadre européenne sur l'eau. LU : Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/75396>

F. Macary, G. Lucas, O. Riglos, E. Lavie, 2006, Méthode de changement d'échelle pour l'estimation Du potentiel de contamination des eaux de surface par l'azote. Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF, p. 35 - p. 49. Hal-00601217

Gagnon, Jeran, 2009, « Impact des différentes formes d'azote (Urée, NH₄⁺, NO₃⁻) sur la croissance des plantes et sur le lessivage des engrais », s. d., 72.

G. EWODO MBOUDOU, A. OMBOLO, A.F BON, F. NTEP, E. BINELI- 2016 - Apport des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères du bassin versant de l'Abiergué (région de Yaoundé) - Science de la vie, de la terre et agronomie, VOL.04 NUM.02.

G. Touche et P. Morlon, 1999, Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve utile des sols dans le périmètre de L'OGAF

Hasaina Sitraka Andranarisoa - 2009 - Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers : Effet du type de sol et de l'essence forestière. Science Agricoles - Université Henri Poincaré

INRA 2003 : "Le climat change, la nature et l'agriculture aussi ! Quels impacts ? Quelles adaptations ?"

J. Tournebize - SD "Quantification et maîtrise des flux de nitrates : de la parcelle drainée au bassin versant"- <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles-eat/pdf/DG2008-PUB00024193.pdf>

J. Tournebize, M-P. Arlot, C. Billy, F. Birgand, et J-P. Gillet, 2008 « Quantification et maîtrise des flux de nitrates : de la parcelle drainée au bassin versant », s. d., 21

Les services de l'Etat de Saône-et-Loire, Agriculture & Elevage, 2021,

http://www.saone-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/7_agriculture_elevage_fusion_compressed.pdf

Les sols dominants en France métropolitaine, 2019, GISSOL

Légifrance : Arrêté du 22 novembre 1993 relatif au code de Bonnes Pratiques Agricoles :
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000362190>

Lien entre géologie et hydrogéologie, SIGES (Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines) Seine-Normandie, <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article21>

Mantilla-Morales, 1995, Critique du modèle sur un petit bassin expérimental de la Charente : le bassin de la ruine

Marion, André, 1998, « Nitrate : un polluant de longue durée »

Mérigout, Patricia, 2006, « Étude Du Métabolisme de La Plante En Réponse à l'apport de Différents Fertilisants et Adjuvants Culturels. Influence Des Phytohormones Sur Le Métabolisme Azoté. », s. d., 230.

M. Ubertosi (Chercheur Maître de Conférences) – 2021- PowerPoint de cours, Master SEME - UE5 - Impact des pratiques agricoles, valorisation agricole des déchets organiques

P. Durand, J. Launay, 2021, Zones humides et haies : Rappels sur leur rôle et leur efficacité pour réduire les flux de nitrates, hal-03344151

Pellerin S., Bamière L., Angers D., et al, 2013, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Rapport d'étude, INRA (France), 454 p.

P. Le Goffe, 2013, La directive nitrates, incompatible avec l'élevage ? Le cas de la France et des pays d'Europe du Nord. 28 p., policy paper, hal-01208879

Portrait agricole du Pays Charolais-Brionnais en 2013 publication de la direction départementale du territoire de saône et Loire - 2013

Préfet de la Saône et Loire -

http://www.saone-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/part_de_la_surface_en_prairies_dans_la_sau_des_exploitations_par_communes_en_2020_a4.pdf

Préfet de la Saône et Loire -

http://www.saone-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/petites_regions_agricoles_a4.pdf

SIGES, Seine-Normandie, 2019 -

["https://www.brgm.fr/fr/site-web/siges-seine-normandie-systeme-information-gestion-eaux-souterraines"](https://www.brgm.fr/fr/site-web/siges-seine-normandie-systeme-information-gestion-eaux-souterraines)

Schéma présentant la structure géologique simplifiée du Brionnais :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/geologie-terroir-Brionnais.xml#stratigraphie>

S. Laval, A. Galli, A-L. Bonin, p.41, Janvier 2018, Évaluation environnementale du 6ème programme d'actions régional Bourgogne-Franche-Comté intervenu en application de la directive 91/676 CEE dite "directive nitrate" du 12 décembre 1991,

Taras E. Lychuk et al., 2021 -

"Evaluation of climate change impacts and effectiveness of adaptation options on nitrate loss, microbial respiration, and soil organic carbon in the Southeastern USA"
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X21001633>

Trouche & Morlon, 1999 - "Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (R. U) dans le périmètre de l'O.G.AF"

Vertes et al., 2007 - "Prairies et qualité de l'eau. Evaluation des risques de lixiviation d'azote et optimisation des pratiques"

Annexes

Annexe 1 - Tableau synthétique des différentes familles de sols retrouvées dans le Charolais-Brionnais avec leur catégorie et leur description

Catégories des sols	Familles de sol	Description
Sols soumis à l'excès d'eau (Sol épais ; supérieurs à 50 cm. Saturé en eau ; temporaire ou permanent)	Pelosol	Forte teneur en argile (sup à 40%) de type semi-gonflante En hiver, l'eau circule très mal et la surface est très régulièrement saturée
	Reductisol	Saturés en permanence ou quasi-permanence par l'eau
Sols évolués (Sol moyennement épais à épais ; entre 35 cm et plus de 50 cm)		Moyennement épais à épais (plus de 35cm) Acides à très acides Développés à partir de grès, schistes ou roches cristallines Riche en aluminium, potentiellement néfaste pour la nutrition des plantes
	Luvisol	Sol épais (plus de 50cm) Fort lessivage vers la profondeur (argile et fer) Bonne fertilité agricole en surface malgré une saturation possible en eau en hiver
	Néoluvisol	Proches des luvisols mais avec un processus de lessivage vertical pour l'argile et le fer moins marqué.
	Podzosol	Migration de constituants organo-métalliques de fer et/ou d'aluminium, puis une accumulation dans un horizon sous-jacent. Horizons très différenciés les uns des autres.
Sol peu évolué (Sol moyennement épais ; plus de 35cm)	Brunisol	Moyennement épais à épais Horizon intermédiaire très poreux
Sol des vallons et vallées	Fluvisol	Matériaux fins, inondables en période de crue à plutôt imperméable
Sols issus de matériaux calcaires (Sol peu épai : moins de 35 cm)	Rendisol	Sols reposants sur des roches calcaires libérant peu de carbonates de calcium. pH neutre ou basique, caillouteux, très séchants, très perméables.
	Calcisol	Relativement pauvres en carbonates de calcium, pH neutre à basique. Souvent argileux, peu ou pas caillouteux, moyennement séchants, souvent perméables.
	Rendosol	Reposant sur une roche calcaire très fissurée et riche en carbonates de calcium. pH basique, souvent argileux, caillouteux, très séchants et très perméables.
Sols minéraux (Sol peu épais : moins de 30 cm)	Rankosol	Peu différenciés, développés à partir de roches non calcaires. Plutôt acides, contiennent de nombreux éléments grossiers.

Source : GISSOL, 2019