

Etude des populations de moulette perlière sur le site Natura 2000
FR8302040

« Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon »



Décembre 2021



Sylvain Vignaud



Préambule

Cette étude a été menée dans le cadre de l'animation du site Natura 2000 FR8302040 « Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon ». Elle intègre des résultats acquis dans le cadre du contrat de rivière animé par l'EPAGE Loire Lignon depuis 2016 avec une vision transversale au regard des exigences de la moulette perlière. Elle intègre aussi des résultats propres liés à l'étude cartographique du site Natura 2000 pour le compte du PNR du Livradois-Forez.

Référence proposée :

VRIGNAUD S., MOREAU C., LELIEVRE H., BRUNOD P., DUMONT A., RIOM S., SAUVANET J., 2021. Etude des populations de moulette perlière sur le site Natura 2000 FR8302040 « Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon ». Rapport pour le Parc Naturel Régional du Livradois-Forez. 117 pages + annexes.

Table des matières

Préambule	2
Table des figures.....	5
Table des tableaux.....	10
Table des équations.....	11
Remerciements	12
Introduction générale.....	13
1.Température de l'eau.....	13
1.1. Méthodologie.....	14
1.2. Résultats.....	16
1.3. Discussion	22
2.Autres variables physico-chimiques.....	24
2.1. Méthodologie.....	24
2.2. Résultats.....	27
2.3. Discussion	41
3.Peuplement piscicole et Infection des truites.....	43
3.1. Méthodologie.....	43
3.2. Résultats.....	45
3.3. Discussion	47
4.Indice hydrobiologique et Indice diatomée	48
4.1. Méthodologie.....	48
4.1.1. Localisation des points d'échantillonnage et date d'échantillonnage	48
4.1.2. Indices diatomiques.....	48
4.1.3. Analyse statistique	48
4.2. Résultats.....	48
4.3. Discussion	53
5.Suivi de tronçons.....	55
5.1. Méthodologie.....	56
5.1.1. Perméabilité sédimentaire.....	56
5.1.2. Granulométrie	56
5.1.3. Physico-chimiques de l'eau	57
5.1.4. Périodicité des analyses	57
5.1.5. Analyse statistique	58
5.2. Résultats.....	58
5.2.1. Perméabilité sédimentaire.....	58
5.2.2. Granulométrie	60

5.2.1. Analyse de la physico-chimiques de l'eau	66
5.3. Discussion	74
6. Etude cartographique.....	77
Introduction.....	77
6.1. Méthodologie.....	77
6.1.1. Plan d'échantillonnage	77
6.1.2. Cartographie.....	79
6.1.3. Statistiques	81
6.2. Résultats	83
6.2.1. Description des variables.....	83
6.2.2. La présence / absence de la moulette perlière	92
6.2.3. L'occupation du sol prise isolément.....	103
6.2.4. Suivant les situations : régression, maintien ou absence par comparaison entre les données de Cochet de 1998 à 2003 et VRIGNAUD (2018).....	104
6.3. Discussion	109
Conclusion générale	114
Références bibliographiques	114
Annexes	117
Annexe 1 : Densités de poissons (en effectifs) lors des pêches électriques d'Athos Environnement (2019)	117
Annexe 2 : Densités de masse de poissons (en g/m ²) lors des pêches électriques d'Athos Environnement (2019)	118
Annexe 3 Représentations graphiques de l'évolution des variables physico-chimiques qui n'ont pas de variations significatives entre 2007 et 2021 et qui ne figurent pas dans le référentiel d'exigence de la moulette perlière.....	119
Ammonium.....	119
Azote Kjeldhal.....	120
Carbone organique dissous	120
Demande Chimique en Oxygène	121
Matières en suspension	121
Nitrites	122
Concentration en oxygène dissous.....	122
Orthophosphates.....	123
Phosphore total.....	123
Turbidité	124
Taux de saturation en oxygène dissous.....	124
Annexe 4 : Codes des espèces de poissons et écrevisses	125

Annexe 5 : Matrices de corrélation pour les modèles linéaires généralisés binomiaux.....	126
Codes des variables	126
Entre les variables à l'échelle du bassin versant (0 à 250 m)	127
Entre les variables sur la bande 0 à 10	127
Entre les variables sur la bande 10 à 20 m	127
Entre les variables sur la bande 20 à 50 m	128
Entre les variables sur la bande 50 à 100 m	128
Entre les variables sur la bande 100 à 140 m	129
Entre les variables sur la bande 140 à 200 m	129
Entre les variables sur la bande 200 à 240 m	130
Annexe 6 : Valeurs des variables d'occupation des sols et des pentes.....	131
Les surfaces en feuillus.....	131
Les Forêts indéterminées	131
Les cultures.....	132
Les haies	132
Les landes	133
Les milieux aquatiques	133
Les prairies temporaires	134
Les pentes moyennes	134
Les pentes minimales	135

Table des figures

<i>Figure 1 : Localisation de la sonde enregistreuse de la température.....</i>	14
Figure 2 : Variations mensuelles des températures de 2009 à 2020 sur l'Ance du nord au niveau de Pontempeyrat (Usson-en-Forez)	16
Figure 3 : Variations annuelles des températures de 2009 à 2020 sur l'Ance du nord au niveau de Pontempeyrat (Usson-en-Forez)	17
Figure 4 : Evolution des températures par décennies et par mois (à Pontempeyrat).....	18
Figure 5 : Variations annuelles des températures de février de 2009 à 2020	18
Figure 6 : Variations annuelles des températures de juillet de 2009 à 2020.....	18
Figure 7 : Variations annuelles des températures d'août de 2009 à 2020	19
Figure 8 : Variations annuelles des températures de novembre de 2009 à 2020	19
<i>Figure 9 : Nombre d'heures par an avec une température supérieure à 19°C.....</i>	19
Figure 10 : Variation de température de l'eau entre le 29/04 et le 29/10/2019 sur le bassin versant de l'Ance du nord	21
Figure 11 : Variation du coefficient de conversion de la température des stations CT03 et CT04 par rapport à Pontempeyrat.....	21
Figure 12 : Variation de température sur le point CT04 entre avril et octobre 2019 (la ligne en pointillés orange représente la limite de température de confort de la truite perlière)	22
<i>Figure 13 : Localisation des stations de relevés physico-chimiques par Eurofins.....</i>	26

<i>Figure 14 : Représentation graphique de l'analyse de composantes principales des variables physico-chimiques en fonction des périodes (2014-2015 et 2019-2020).</i>	27
<i>Figure 15 : Représentation graphique de l'analyse de composantes principales des variables physico-chimiques en fonction de la situation au regard de la mulette perlière.</i>	28
<i>Figure 16 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe de l'ACP en fonction des situations au regard de la mulette perlière</i>	28
<i>Figure 17 : Représentation graphique de l'analyse de composantes principales des variables physico-chimiques en fonction des stations</i>	30
<i>Figure 18 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe de l'ACP en fonction des stations</i>	30
<i>Figure 19 : Potentialité de présence de la mulette perlière en fonction des analyses physico-chimiques</i>	31
<i>Figure 20 : Variation de valeur de pH entre 2014-2015 et 2019 -2020 (la ligne pointillée orange indique la limite maximale de tolérance de la mulette perlière : ph de 7,1)</i>	33
<i>Figure 21 : Variation au cours l'année du pH et suivant les années la ligne pointillée orange indique la limite maximale de tolérance de la mulette perlière : ph de 7,1)</i>	34
<i>Figure 22 : Variation du pH et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021) la ligne pointillée orange indique la limite maximale de tolérance de la mulette perlière : ph de 7,1)</i>	35
<i>Figure 23 : Variation de la conductivité entre 2014-2015 et 2019 -2020 (la ligne pointillée orange indique la limite de tolérance de la mulette perlière et la ligne continue la valeur maximale)</i>	36
<i>Figure 24 : Variation de la conductivité et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021) (la ligne pointillée orange indique la limite de confort de la mulette perlière et en continue la limite maximale de tolérance)</i>	36
<i>Figure 25 : Variation du taux de saturation en oxygène entre 2014-2015 et 2019-2020</i>	37
<i>Figure 26 : Variation du taux de saturation en oxygène dissous et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021)</i>	38
<i>Figure 27 : Variation de la demande biologique en oxygène sur 5 jours entre 2014-2015 et 2019-2020</i>	39
<i>Figure 28 : Variation de la DBO5 et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021)</i>	39
<i>Figure 29 : Variation du taux de nitrates entre 2014-2015 et 2019-2020 (la ligne en pointillés représente la teneur maximale tolérée par la mulette perlière)</i>	40
<i>Figure 30 : Variation du taux de nitrates et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021) (la ligne en pointillés représente la limite maximale de tolérance de la mulette perlière)</i>	40
<i>Figure 31 : Localisation des pêches électriques menées par Athos Environnement (2019)</i>	43
<i>Figure 32 : Localisation des pêches électriques destinées à la recherche de glochidies</i>	44
<i>Figure 33 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de poissons – contribution des espèces*</i>	45
<i>Figure 34 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de poissons – ellipses des peuplements suivant la situation vis-à-vis de la mulette perlière</i>	45
<i>Figure 35 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de masses – contribution des espèces*</i>	45
<i>Figure 36 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de masses – ellipses des peuplements suivant la situation vis-à-vis de la mulette perlière</i>	45
<i>Figure 37 : Nombre moyen de glochidies par truite (Athos Environnement 2019) et nombre de mulettes perlières estimées (selon VRIGNAUD, 2018)</i>	46

Figure 38 : Positionnement des points d'échantillonnage suivant l'AFC du peuplement de diatomées en 2019.....	49
Figure 39 : Dendrogramme des stations de prélèvements suivant leur peuplement de diatomées en 2019.....	49
Figure 40 : Classement des points de prélèvement suivant le peuplement de diatomées et le dendrogramme pour l'année 2019	49
Figure 41 : Positionnement des points d'échantillonnage suivant l'AFC du peuplement de diatomées en 2020.....	50
Figure 42 : Dendrogramme des stations de prélèvements suivant leur peuplement de diatomées en 2020.....	50
Figure 43 : Classement des points de prélèvement suivant le peuplement de diatomées et le dendrogramme pour l'année 2020	50
Figure 44 : Variation de l'ensemble des indices biologiques diatomée (IBD) au fil des ans	51
Figure 45 : Variation de chacun des indices biologiques diatomées (IBD) des stations	51
Figure 46 : Variation de l'ensemble des Indices de polluosensibilité Spécifique (IPS) au fil des ans	51
Figure 47 : Variation de chacun des Indices de polluosensibilité Spécifique (IPS) des stations.....	51
Figure 48 : Contribution des variables à l'analyse de composantes principales (ACP) de l'I2M2 et ses composantes pour 2019 et 2020	52
Figure 49 : Positionnement des points d'échantillonnage suivant l'ACP de l'I2M2 et ses composantes pour 2019 et 2020	52
Figure 50 : Dendrogramme des stations de prélèvements suivant l'I2M2 et ses composantes pour les années 2019 et 2020	53
Figure 51 : Variation de l'I2M2 entre 2019 et 2020	53
Figure 52 : Variation de l'I2M2 entre 2019 et 2020 suivant les stations	53
Figure 53. Potentiel redox et fonctionnalité des cours d'eau pour la Moule perlière (d'après Geist & Auerswald 2007).....	56
Figure 54 : Graphique de la tendance significative à la baisse du redox de la colonne d'eau aux Genestoux	58
Figure 55 : Graphique de la tendance significative à la baisse du redox à 5 cm de profondeur aux Genestoux	58
Figure 56 : Graphique de la tendance significative à la baisse du redox à 10 cm de profondeur aux Genestoux	59
Figure 57 : Variation du redox de la colonne d'eau sur tous les sites en fonction des années	59
Figure 58 : Variation du redox à 5 cm de profondeur sur tous les sites en fonction des années	59
Figure 59 : Variation du redox à 10 cm de profondeur sur tous les sites en fonction des années.....	60
Figure 60 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie des Genestoux.....	61
Figure 61 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP pour les Genestoux.....	61
Figure 62 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour le site des Genestoux	61
Figure 63 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie d'Ancette (rivière) ...	62
Figure 64 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP pour Ancette (rivière)	62
Figure 65 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour le site d'Ancette (rivière).....	62
Figure 66 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie du Fieu.....	63
Figure 67 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP pour le Fieu	63
Figure 68 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour le site du Fieu	63
Figure 69 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie suivant les sites	64
Figure 70 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP suivant les sites.....	64

Figure 71 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP granulométrie suivant les sites	64
Figure 72 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour l'ensemble des sites suivant les années	64
Figure 73 : Boîtes à moustaches de la proportion de sédiments de 0,5 à 1 mm de diamètre suivant les sites.....	65
Figure 74 : Boîtes à moustaches de la proportion de sédiments de 1 à 5 mm de diamètre suivant les sites.....	65
Figure 75 : Boîtes à moustaches de la proportion de sédiments de plus de 5 mm de diamètre suivant les sites	65
Figure 76 : Boîtes à moustaches des valeurs de redox à 5 cm de profondeur suivant les sites	66
Figure 77 : Boîtes à moustaches des valeurs de redox à 10 cm de profondeur suivant les sites	66
Figure 78 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau sur les Genestoux ..	67
Figure 79 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP sur les Genestoux.....	67
Figure 80 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP de la qualité de l'eau pour les Genestoux	67
Figure 81 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau sur l'Ancette (rivière)	68
Figure 82 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP sur l'Ancette (rivière)	68
Figure 83 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP de la qualité de l'eau pour l'Ancette (rivière).....	68
Figure 84 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau sur le Fieu	69
Figure 85 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP sur le Fieu	69
Figure 86 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP de la qualité de l'eau pour le Fieu	69
Figure 87 : Contribution des variables dans l'ACP de la qualité de l'eau portant sur la granulométrie suivant les sites.....	70
Figure 88 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les sites par l'ACP.....	70
Figure 89 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP qualité de l'eau suivant les sites	70
Figure 90 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau suivant les années .	71
Figure 91 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP suivant les années	71
Figure 92 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP qualité de l'eau suivant les années	71
Figure 93 : Graphique de la tendance significative à la baisse du taux de nitrites (mg/L).....	74
Figure 94 : Proportion des différentes situations des densités de moulettes perlière sur l'Ance du nord et ayant servi d'échantillon (comparaison entre 1998-2003 et 2018 ; VRIGNAUD, 2018).....	77
Figure 95 : Localisation des points de relevés.....	78
Figure 96 : Disposition des différentes zones tampons (exemple de l'Arzon).....	80
Figure 97 : Occupation du sol sur l'étendue maximale des zones tampons (250 m) (exemple de l'Arzon)	85
Figure 98 : Pourcentage de surfaces couvertes suivant l'occupation du sol à l'échelle des bassins versants de l'Ance du nord et de l'Arzon	87
Figure 99 : Cartographie des pentes sur la zone d'étude.....	88
Figure 100 : Pourcentage de surface recouverte par des forêts de conifères suivant la distance à la berge.....	89
Figure 101 : Pourcentage de surface recouverte par des prairies permanentes suivant la distance à la berge.....	90

Figure 102 : Pourcentage de surface recouverte par des surfaces artificielles suivant la distance à la berge.....	90
Figure 103 : Pentés maximales (en %) suivant la distance à la berge	91
Figure 104 : Profil des pentés maximales cumulées en fonction des rivières (« riv »)	92
Figure 105 : Effet des prairies permanentes sur la présence de la moulette perlière en fonction de la pente sur la bande 0 à 10 m	93
<i>Figure 106 : Représentation graphique des nuages de points en fonction de la présence ou non de la moulette perlière par l'Analyse de Composantes Principales sur la bande tampon de 0 à 250 m</i>	<i>103</i>
Figure 107 : Probabilité de présence de la présence de la moulette perlière en fonction de la pente minimale sur la bande de 0 à 250 m	104
<i>Figure 108 : Probabilité de présence de la présence de la moulette perlière en fonction de la surface en conifères sur la bande de 0 à 250 m (GLM quadratique)</i>	<i>104</i>
Figure 109 : Représentation des contributions des variables dans l'ACP de l'occupation des sols sur l'ensemble des bandes tampons (de 0 à 250 m).....	105
Figure 110 : Représentation de l'ACP de l'occupation des sols suivant les situations de maintien, de régression et d'absence sous forme d'ellipses sur l'ensemble des bandes tampons (de 0 à 250 m). 105	105
Figure 111 : Projection des situations de maintien, de régression et d'absence de mulettes perlières sur l'axe 1 de l'ACP	105
Figure 112 : Boîtes à moustaches des pentés minimales sur la bande tampon de 0 à 250 m suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de moulette perlière	106
Figure 113 : Boîtes à moustaches des pentés maximales sur la bande tampon de 0 à 250 m suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de moulette perlière	107
Figure 114 : Probabilité de présence en fonction de l'occupation des sols et de la pente (vue d'ensemble des bassins versants de l'Arzon	111
Figure 115 : Détail géographique de la probabilité de présence en fonction de l'occupation des sols et de la pente (Ance du nord).....	112
Figure 116 : Fréquences des pixels en fonction de la probabilité de présence pour le bassin versant de l'Arzon (bandes 0 à 250 m).....	113
Figure 117 : Fréquences des pixels en fonction de la probabilité de présence pour le bassin versant de l'Ance (bandes 0 à 250 m)	113

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Stations de suivi de la qualité de l'eau et situation au regard de la mulette perlière</i>	15
<i>Tableau 2 : Tendances des températures en fonction des mois de 2009 à 2020 sur l'Ance du nord au niveau de Pontempeyrat (Usson-en-Forez)</i>	17
<i>Tableau 3 : Nombre d'heures par an avec une température supérieure à 19°C (maximum de la zone de confort pour la truite fario) et 23°C (maximum pour la mulette perlière)</i>	20
<i>Tableau 4 : Liste des variables physico-chimiques relevées</i>	24
<i>Tableau 5 : Modifications de valeurs de différentes variables pour les relevés de 2014-2015</i>	25
<i>Tableau 6 : Valeurs limitatives de la mulette perlière selon Simon et al. (non daté)</i>	25
<i>Tableau 7 : Différentiation des groupes statistiques significativement différents suivant le test de Tuckey portant sur la projection sur l'axe 1 de l'ACP</i>	28
<i>Tableau 8 : Contribution des variables physico-chimiques à la discrimination entre les différentes situations au regard de la situation de la mulette perlière</i>	29
<i>Tableau 9 : Différentiation des groupes de stations significativement différentes suivant le test de Tuckey portant sur la projection sur l'axe 1 de l'ACP</i>	31
<i>Tableau 10 : Valeurs moyennes et évolution des différentes variables physico-chimiques entre 2014-2015 et 2019-2020</i>	32
<i>Tableau 11 : Coefficient directeur et intervalle de confiance des modèles linéaires généralisés basé sur la variation du pH, du taux d'oxygène dissous et de la DBPO5 en fonction des années</i>	33
<i>Tableau 12 : Caractéristique des stations de pêche électriques destinées à la recherche de glochidies (suivant Athos Environnement, 2019)</i>	47
<i>Tableau 13 : Contribution des variables sur l'axe 1 de l'ACP</i>	52
<i>Tableau 14. Valeur moyenne du potentiel redox (en V) pour des populations fonctionnelles et non fonctionnelles (d'après Geist & Auerswald 2007)</i>	56
<i>Tableau 15 : Liste des variables physico-chimiques relevés dans le cadre des analyses d'eau</i>	57
<i>Tableau 16 : Transformation des valeurs basses des variables physico-chimiques</i>	57
<i>Tableau 17 : Groupes significativement distincts suivant le test de Tuckey suivant la proportion de granulométrie de 0,5 à 1 mm</i>	65
<i>Tableau 18 : Groupes significativement distincts suivant le test de Tuckey suivant la proportion de granulométrie de 1 à 5 mm</i>	65
<i>Tableau 19 : Groupes significativement distincts suivant le test de Tuckey suivant la proportion de granulométrie de plus de 5 mm</i>	66
<i>Tableau 20 : Contributions relatives (en %) des variables sur l'axe 1 de l'ACP qualité de l'eau et tendances observées sur la période 2017-2021</i>	72
<i>Tableau 21 : Tendances de chacune des variables de 2017 à 2021 en fonction de chacun des tronçons</i>	73
<i>Tableau 22 : Tendances de chacune des variables de 2017 à 2021 pour l'ensemble des sites</i>	74
<i>Tableau 23 : Tendances observées et hypothèses d'explications des variations d'effectifs de mulettes perlières suivant les sites suivis</i>	75
<i>Tableau 24 : Effectifs et proportion des situations d'évolution de densité de mulettes perlières sur l'Ance du nord ayant servi d'échantillons (comparaison entre 1998-2003 et 2018 ; Vrignaud, 2018)</i> .	77
<i>Tableau 25 : Variables géographiques et origine des données</i>	79
<i>Tableau 26 : GLM testés pour apprécier l'effet des milieux ouverts ou anthropisés suivant les pentes comme potentiellement impactant la mulette perlière en fournissant ou pas des sédiments fins</i>	81
<i>Tableau 27 : GLM testés pour apprécier l'effet de la ripisylve et de la pente de la rivière sur la mulette perlière (bande tampon de 0 à 10 m)</i>	82

Tableau 28 : Moyennes et bornes de l'intervalle de confiance des différentes variables géographiques sur l'ensemble des bandes tampon	84
Tableau 29 : Liste des catégories regroupées	86
Tableau 30 : Pourcentage moyen de recouvrement et intervalle de confiance des différentes occupations du sol à l'échelle de l'ensemble des bassins versants de l'Ance du nord et de l'Arzon ...	87
Tableau 31 : Points de bascule de la pente maximale sur la contribution des forêts de conifères sur la présence de la moulette perlière (effet positif en deçà, négatif au-delà)	94
Tableau 32 : Points de bascule de la pente maximale sur la contribution des prairies permanentes sur la présence de la moulette perlière (effet négatif en deçà, positif au-delà).....	94
Tableau 33 : Points de bascule de la pente minimale sur la contribution des forêts de feuillus sur la présence de la moulette perlière (effet positif en deçà, négatif au-delà)	94
Tableau 34 : Points de bascule de la pente sur la contribution des milieux fermés sur la présence de la moulette perlière	95
Tableau 35 : Synthèse des conclusions hypothèse par hypothèse	96
Tableau 36 : Caractéristiques des modèles linéaires généralisés (en interaction) testés pour apprécier l'effet des milieux ouverts et anthropisés suivant les pentes comme potentiellement impactant la moulette perlière en fournissant ou pas des sédiments fins	97
Tableau 37 : Contribution des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative) sur la probabilité de présence de la moulette perlière.....	99
Tableau 38 : Contribution de la fermeture du milieu et du travail du sol sur la moulette perlière suivant des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative)	100
Tableau 39 : Base de la carte inférentielle	101
Tableau 40 : Caractéristiques des modèles linéaires généralisés testés pour apprécier l'effet de la ripisylve comme potentiellement impactant la moulette perlière en contingentant la rivière et en augmentant l'instabilité sédimentaire	102
Tableau 41 : Contribution de la ripisylve sur la présence de la moulette perlière suivant des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative)	102
Tableau 42 : Probabilité de la discrimination par l'analyse de composantes principales sur la présence absence de la moulette perlière par bande tampon.....	103
Tableau 43 : Caractéristiques des modèles linéaires généralisés quadratiques des conifères sur la présence / absence de la moulette perlière et sur la bande de 0 à 250 m.....	104
Tableau 44 : Caractéristiques des pentes minimales et répartition des groupes suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de moulette perlière sur la bande tampon de 0 à 250 m d'après le test de Tuckey.....	106
Tableau 45 : Caractéristiques des pentes maximales et répartition des groupes suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de moulette perlière sur la bande tampon de 0 à 250 m d'après le test de Tuckey.....	107
Tableau 46 : Contribution des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative) sur la probabilité de maintien de la moulette perlière	108
Tableau 47 : Contribution de la ripisylve sur la probabilité de maintien de la moulette perlière suivant des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative)	109

Table des équations

Équation 1 : Equation de la modélisation de la probabilité de présence (modèle logit).....	82
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

Remerciements

Il nous est agréable de remercier La fédération de pêche de la Loire, de la Haute-Loire, du Puy-de-Dôme, les acteurs du contrat de rivières : Elodie PRINTINHAC, Lauriane CHAUTARD et Etienne GRES. Leur implication quotidienne contribue à améliorer l'état de la rivière. Qu'ils en soient ici chaleureusement remerciés.

De même, nous remercions chaleureusement les animateurs du site Natura 2000 en question : Emilie ARDOUIN et Guillaume MOIRON. Leurs convictions et leurs engagements a permis de tirer des conclusions intéressantes non seulement à l'échelle du bassin versant de l'Ance du nord mais aussi plus généralement.

Pour quelques aspects statistiques nous tenons à remercier Jean-Yves BARNAGAUD. Enfin, merci à Pierre-Yves PASCO pour son aide bibliographique toujours efficace.

Introduction générale

La mulette perlière *Margaritifera margaritifera* est en nette régression depuis plusieurs décennies au point d'être classée en danger critique d'extinction en Europe selon l'UICN (CUTTELOD *et al.*, 2011). En France, elle est considérée comme étant en danger (REGNIER *et al.*, 2021). Son intégration au sein des annexes 2 et 4 de la directive 92/43/CEE dite faune-flore-habitats implique que les états membres de l'Union Européenne doivent maintenir cette espèce en bon état de conservation. L'intégration de cette naïade au sein de sites Natura 2000 (Zones Spéciales de Conservation) vise une meilleure prise en compte de cette espèce et de son habitat.

Le site Natura 2000 FR8302040 « Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon » compte une population estimée à 2808 individus (entre 1761 et 4478) (VRIGNAUD 2018). En comparant avec les relevés antérieurs datant de 1998-2003 sur l'Ance (Cochet non publié), cette population présente une importante régression (de l'ordre de 56 % en environ 18 ans). Celle-ci est due à l'absence de recrutement (absence de jeunes venant compenser la mortalité par l'âge).

Une précédente étude toujours menée dans le cadre de Natura 2000 a identifié des causes comme pouvant expliquer cette régression : l'instabilité sédimentaire (la limite du nombre de Reynolds « boundary Reynolds ») et dans une moindre mesure le colmatage sédimentaire (VRIGNAUD *et al.*, 2019).

Parallèlement, dans le cadre du contrat de rivière de l'Ance du nord, des données ont été acquises. Elles portaient sur le peuplement piscicole (ATHOS Environnement 2019), l'état écologique des cours d'eau au sens de la DCE (par Eurofins) et quatre fois par an sur trois sites par Aquabio et la qualité sédimentaire (RIOM 2021). De même un suivi de populations de mulette perlière a été mené sur 4 sites afin d'apprécier les tendances sur la durée du contrat de rivière (VRIGNAUD 2021).

Les données issues du contrat de rivière sont particulièrement précieuses. S'inscrivant sur une durée de 5 ans, elles permettent d'apprécier de façon temporelle l'évolution de certains facteurs et d'avoir une vision sur une plus longue durée qu'une seule année classiquement prise en compte. Cet atout est particulièrement intéressant sur des variables très changeantes telles que la physico-chimie de l'eau. Enfin, elles peuvent être mises en parallèle avec les données issues du suivi de mulettes perlières (VRIGNAUD 2021).

Enfin, des données acquises dans d'autres cadres nous ont été transmises (suivi thermique par la Fédération de pêche de la Loire) ou ont été collectées (qualité physico-chimique dans le cadre du suivi de la qualité de l'eau via le portail internet naïade).

Cette présente étude vise à comprendre les causes de cette régression en s'appuyant sur l'ensemble des données mentionnées ci-dessus et au regard des exigences de la mulette perlière et de son habitat. L'objectif de cette analyse transversale des données issues du contrat de rivière n'est pas de supplanter les rapports effectués antérieurement par les différents prestataires, mais de les compléter en incluant les données de mulettes perlières et le cas échéant en interprétant des données qui n'avaient pas pu l'être jusqu'alors.

1. Température de l'eau

La température de l'eau est intéressante à plusieurs titres. Elle est un facteur identifié pour la zone de confort voire de survie de la mulette perlière et de la truite fario. Pour la mulette perlière, la zone de confort se trouve en deçà de 23°C (SIMON *et al.*, non daté) De même, la truite fario connaît un stress au-delà de 19°C et une létalité au-delà de 25°C (VARLEY, 1967 ; ELLIOTT, 1975 ; ALABASTER & LLOYD,

1980 ; ELLIOTT, 1981 ; CRISP, 1996 ; ELLIOTT & HURLEY, 2001). Aussi, il paraissait intéressant d'apprécier les valeurs de celles-ci et d'en apprécier la tendance.

1.1. Méthodologie

La température de l'eau a été prise par une sonde avec des relevés toutes les heures par la fédération de pêche de la Loire. Le site de collecte se situe à Pontempeyrat sur la commune d'Usson-en-Forez (Loire) (Figure 1).

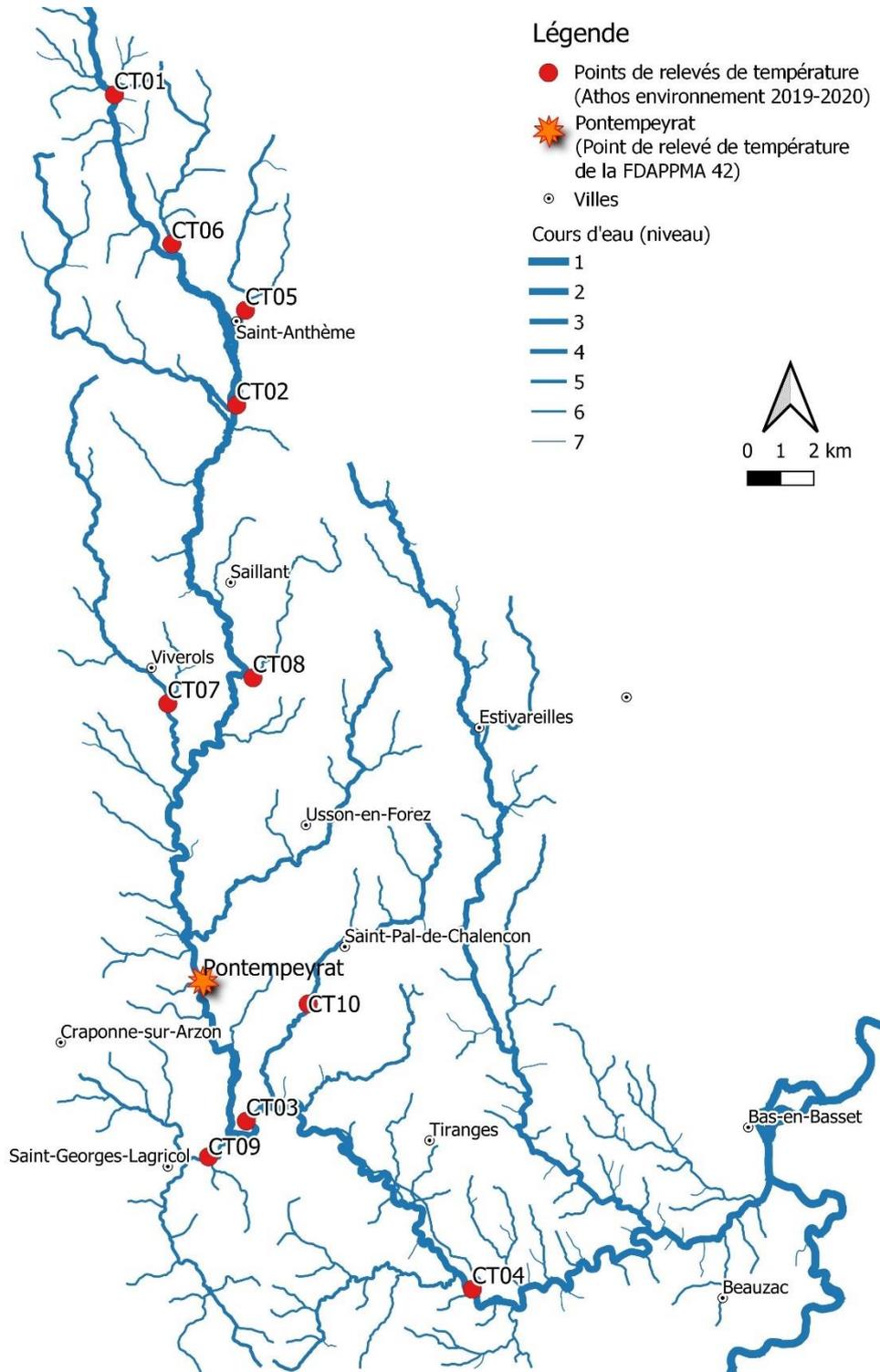


Figure 1 : Localisation de la sonde enregistreuse de la température

Les autres stations d'enregistrement se situent sur l'ensemble du bassin versant de l'Ance du nord sur la rivière de l'Ance mais aussi sur certains affluents (Figure 1). La situation des stations au regard de la présence de mulettes est variable et est reprise dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Stations de suivi de la qualité de l'eau et situation au regard de la moulette perlière

Numéro de la station	Référence d'Eurofins pour les relevés de 2019-2020	Précisions sur la localité	Situation au regard de la moulette perlière
CT01	4405009	Ance à Saint-Anthème	Sans moulette
CT02	4405010	Ance à Saint-Clément-de-Valorgue	Sans moulette
CT03	4405011	Ance à Saint-Julien-d'Ance	Avec moulette
CT04	4405012	Ance à Solignac-sous-Roche / Tiranges	Situation inconnue
CT05	4405013	Vaissières à Saint-Anthème	Situation inconnue
CT06	4405014	Ancette à Saint-Anthème	Situation inconnue
CT07	4405015	Ligonne à Viverols	Situation inconnue
CT08	4405016	Saillantet à Saillant	Situation inconnue
CT09	4405018	Lembron à Saint-Georges-Lagricol	Situation inconnue
CT10	4405019	Chandieu à Saint-Pal-en-Chalencon	Situation inconnue

Les données disponibles concernent une période allant du 30/06/2009 au 10/09/2020. Cela représente 98 180 données. L'analyse a consisté à comparer les températures d'août 2009 à 2020 (soit 12 ans) et à modéliser l'évolution sur cette période (suivant un modèle linéaire généralisé, GLM). De même, l'évolution du nombre d'heures avec une température supérieure à 19°C et à 25°C a été modélisée avec des modèles linéaires généralisés (GLM).

En outre, des données supplémentaires ont été intégrées par Athos Environnement (2017 et 2019). Elles proviennent des différents points de relevés CT01 à CT10 (Figure 1). Ces données ont été acquises du 29/04/2019 (13h00) au 30/10/2019 (8h00).

Une comparaison de ces températures a été effectuée en divisant la valeur du site concerné par celle de Pontempeyrat pour la même heure. Cela permet d'apprécier l'écart à la hausse entre le site CTXX et Pontempeyrat (coefficient supérieur à 1) ou inférieur (coefficient inférieur à 1). Cela permet de mieux apprécier les écarts et l'amplitude des valeurs suivant l'échelle géographique.

1.2. Résultats

Les variations saisonnières nous indiquent fort logiquement que les mois de janvier et février sont les plus froids et juillet et août les plus chauds (Figure 2).

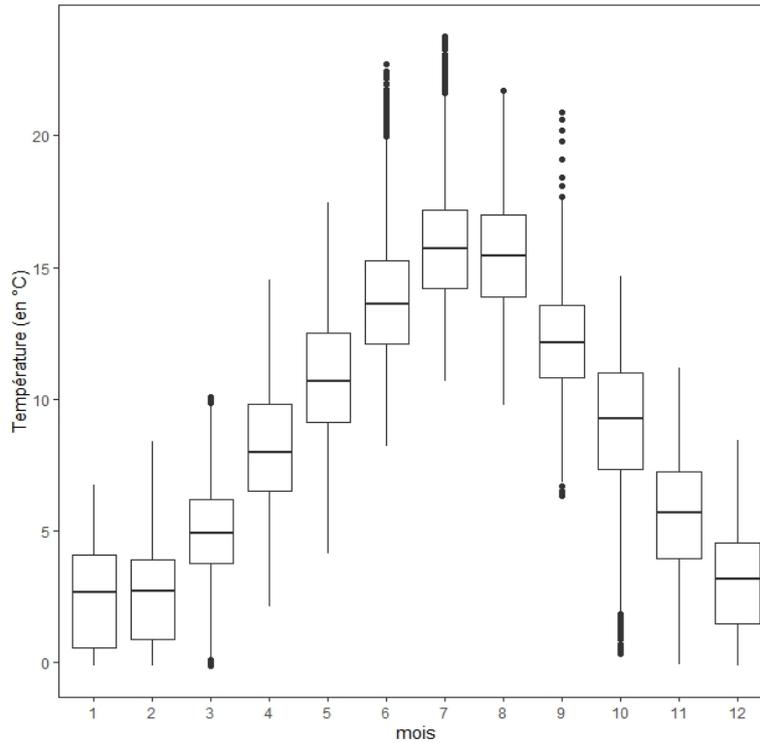


Figure 2 : Variations mensuelles des températures de 2009 à 2020 sur l'Ance du nord au niveau de Pontempeyrat (Usson-en-Forez)

L'analyse de la variation annuelle des températures entre 2009 et 2020 indique une augmentation globale et extrêmement nette (GLM ; $p < 2 \cdot 10^{-16}$) à la hausse de $0,071 \pm 0,005$ °C par an soit $0,71 \pm 0,05$ °C par décennie (Figure 3 et Tableau 2).

Cette augmentation annuelle est très hétérogène suivant les mois car il est constaté une diminution pour le mois de novembre de $0,76 \pm 0,08$ °C par décennie (Figure 8 et Tableau 2). A l'inverse, le mois de février connaît une augmentation particulièrement élevée de $2,42 \pm 0,06$ °C par décennie (Figure 4, Figure 5 et Tableau 2). Les mois estivaux les plus chauds, connaissent une augmentation plutôt contrastée entre le mois d'août ($+ 1,31 \pm 0,05$ °C par décennie (Figure 7) et le mois de septembre ($+ 0,036 \pm 0,07$ °C par décennie).

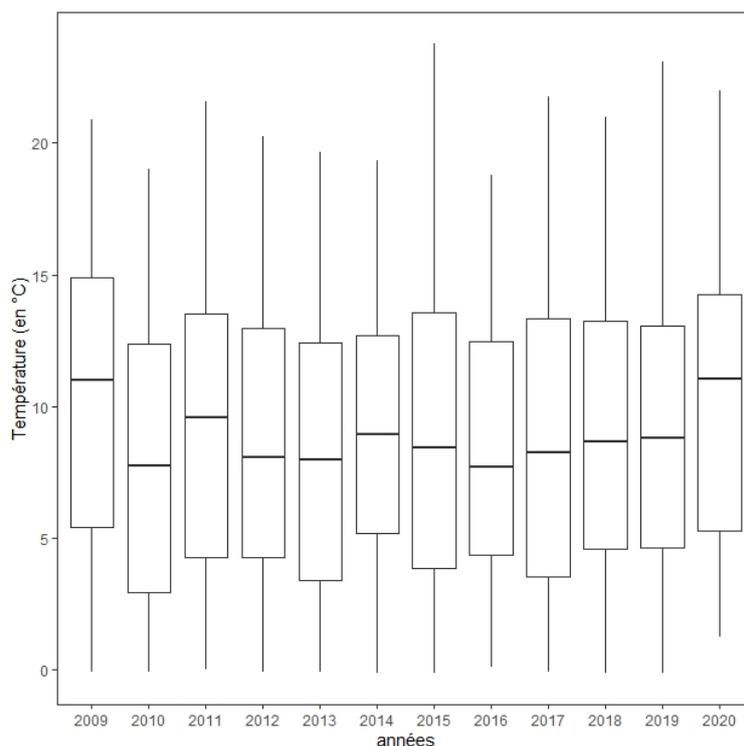


Figure 3 : Variations annuelles des températures de 2009 à 2020 sur l'Ance du nord au niveau de Ponttempeyrat (Usson-en-Forez)

Tableau 2 : Tendances des températures en fonction des mois de 2009 à 2020 sur l'Ance du nord au niveau de Ponttempeyrat (Usson-en-Forez)

Mois	Par an		Pour 10 ans		Probabilité (p)
	Coefficient directeur	Intervalle de confiance	Coefficient directeur	Intervalle de confiance	
Janvier	0,092	0,006	0,92	0,06	<2*10 ⁻¹⁶
Février	0,242	0,006	2,42	0,06	<2*10 ⁻¹⁶
Mars	0,105	0,006	1,05	0,06	<2*10 ⁻¹⁶
Avril	0,131	0,005	1,31	0,05	<2*10 ⁻¹⁶
Mai	0,022	0,009	0,22	0,09	0,0112
Juin	0,059	0,008	0,59	0,08	<2*10 ⁻¹⁶
Juillet	0,087	0,005	0,87	0,05	<2*10 ⁻¹⁶
Août	0,131	0,005	1,31	0,05	<2*10 ⁻¹⁶
Septembre	0,036	0,007	0,36	0,07	<2*10 ⁻⁸
Octobre	0,082	0,009	0,82	0,09	<2*10 ⁻¹⁶
Novembre	-0,076	0,008	-0,76	0,08	<2*10 ⁻¹⁶
Décembre	0,143	0,007	1,43	0,07	<2*10 ⁻¹⁷
Ensemble	0,071	0,005	0,71	0,05	<2*10 ⁻¹⁶

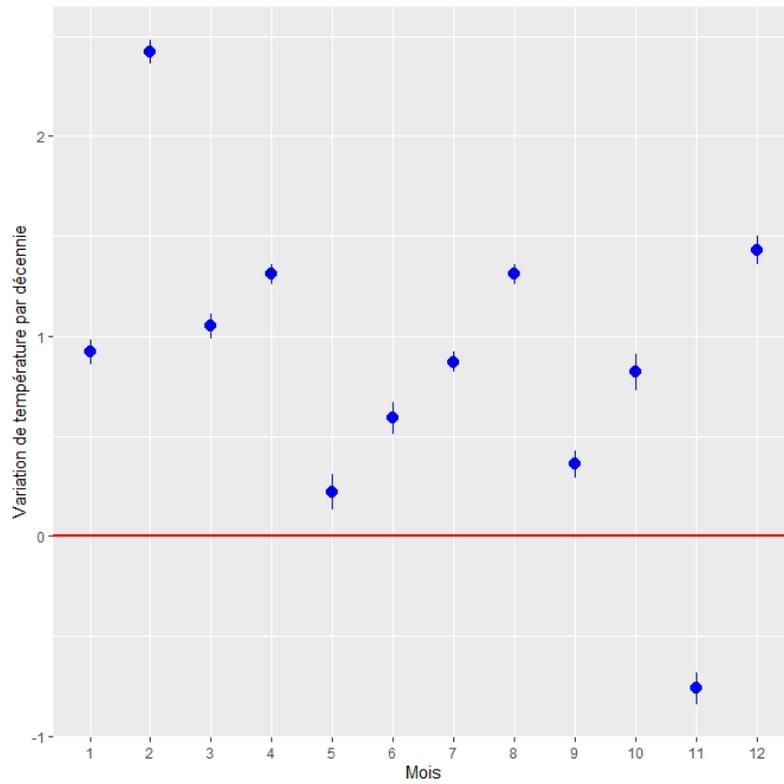


Figure 4 : Evolution des températures par décennies et par mois (à Pontempeyrat)

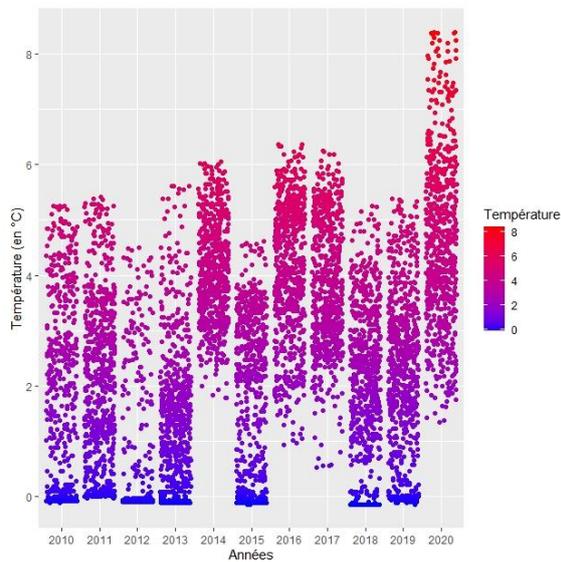


Figure 5 : Variations annuelles des températures de février de 2009 à 2020

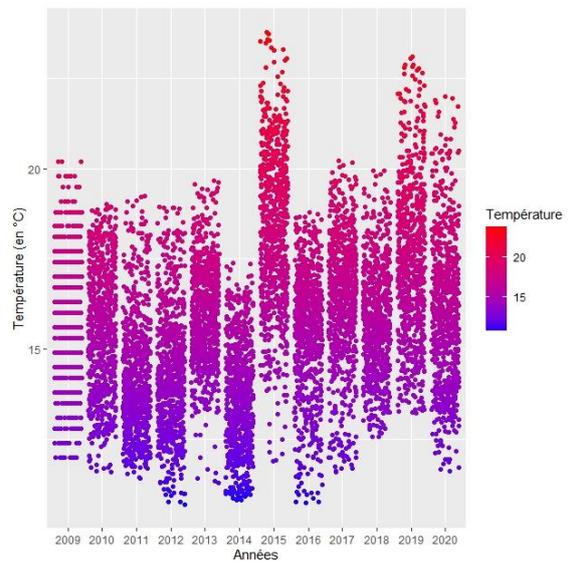


Figure 6 : Variations annuelles des températures de juillet de 2009 à 2020

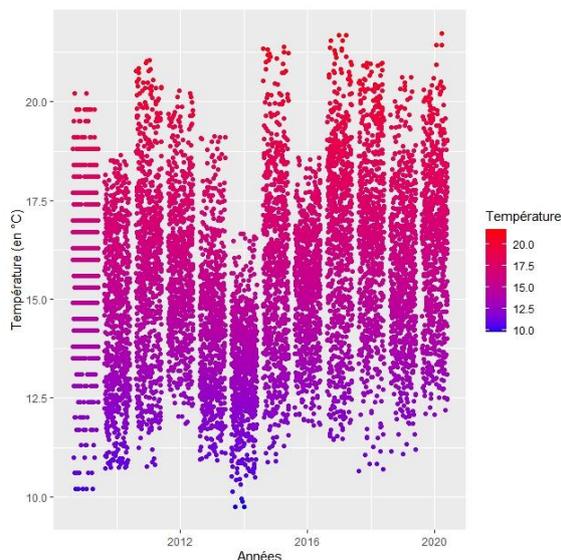


Figure 7 : Variations annuelles des températures d'août de 2009 à 2020

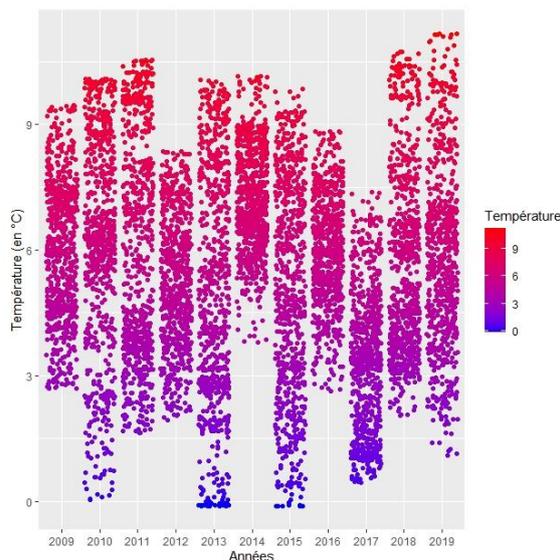


Figure 8 : Variations annuelles des températures de novembre de 2009 à 2020

Durant le mois d'août, seules 14 heures ont une température supérieure à 23°C (température maximale pour la moulette perlière), dont 12 ont été enregistrées en 2015 (du 6 au 7 juillet 2015) et 2 en 2019 (le 24 juillet 2019). Le maximum enregistré est de 23,785°C le 07/07/2015 à 17h.

Par ailleurs et toujours pour le mois d'août, le nombre d'heures avec une température supérieure à 19°C (début du stress pour la truite fario) n'évolue pas nettement entre 2009 et 2020 (GLM, $p = 0,129$) (Figure 9 et Tableau 3). En moyenne, ce sont 110,75 heures par an avec une température de l'eau supérieure à 19°C (minimum en 2016 avec 0 heure et maximum en 2015 avec 372 heures).

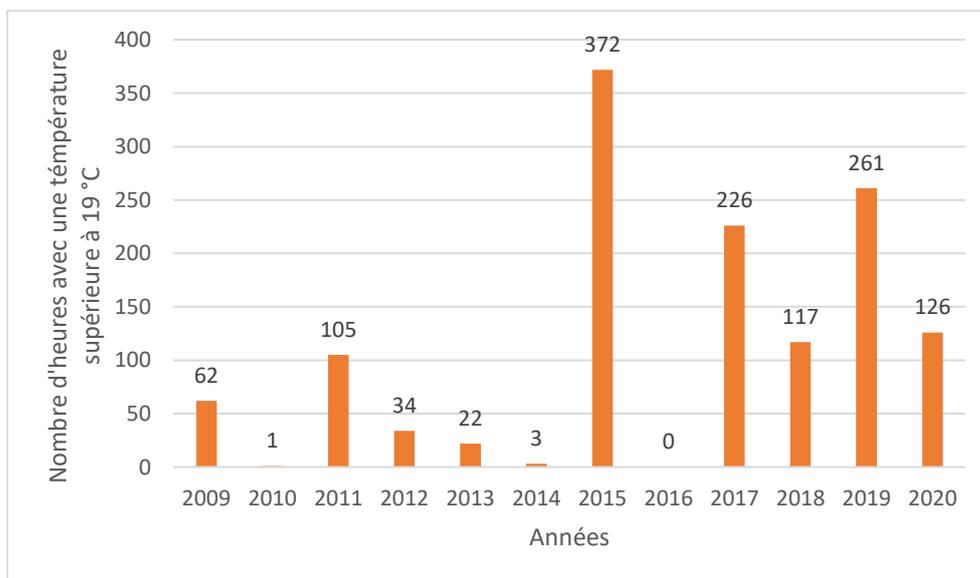


Figure 9 : Nombre d'heures par an avec une température supérieure à 19°C

Tableau 3 : Nombre d'heures par an avec une température supérieure à 19°C (maximum de la zone de confort pour la truite fario) et 23°C (maximum pour la mulette perlière)

Années	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Nombre d'heures avec une température > 19°C	62	1	105	34	22	3	372	0	226	117	261	126
Nombre d'heures avec une température > 23°C	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	2	0

La comparaison entre lieux de relevés au cours de l'année 2019 illustre les différences thermiques suivant le positionnement sur le bassin versant (Figure 10). Fort logiquement, les points de relevés situés en aval possèdent une moyenne de température plus élevée (stations CT03 et CT04). Toutefois, la station CT04 située en aval du barrage de Passouira connaît des écarts de températures impressionnant en mai : compris entre 0,9 et 1,65 fois la température de Pontempeyrat (Figure 11). Ces écarts de températures élevées durant ce mois sont possiblement dus à des écoulements de surface depuis le barrage par jour de beau temps.

Les écarts de températures ont été particulièrement conséquents. Elle a pu passer de 14,02 °C en moyenne le 22/06 à 20,07°C en moyenne le 29/06/2019 à Pontempeyrat.

Le coefficient de température entre Pontempeyrat et CT03 est inférieur au coefficient entre Pontempeyrat et CT04. Cette différence est variable suivant les mois. Il existe des oscillations de températures plus importantes en aval du barrage de Passouira (station CT04).

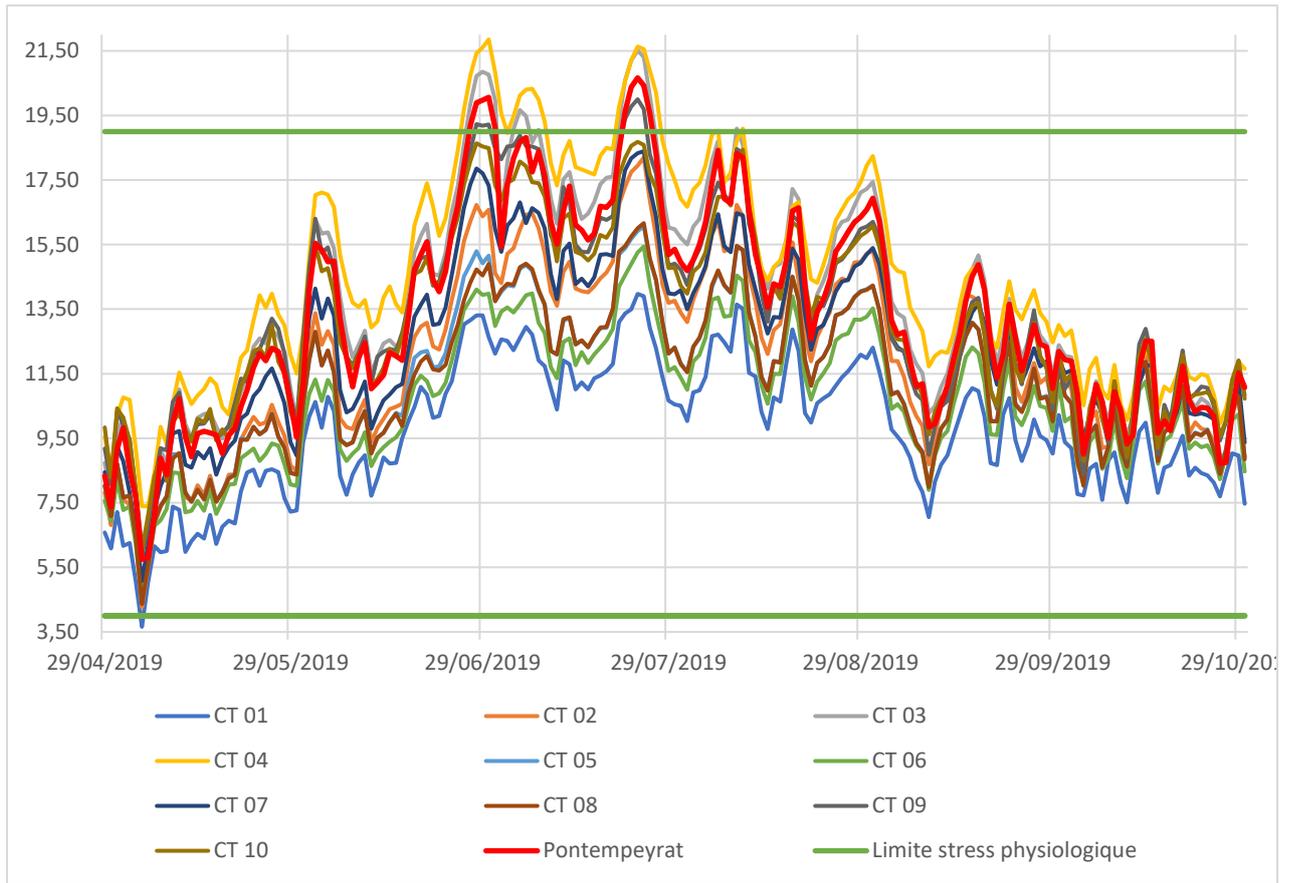


Figure 10 : Variation de température de l'eau entre le 29/04 et le 29/10/2019 sur le bassin versant de l'Ance du nord

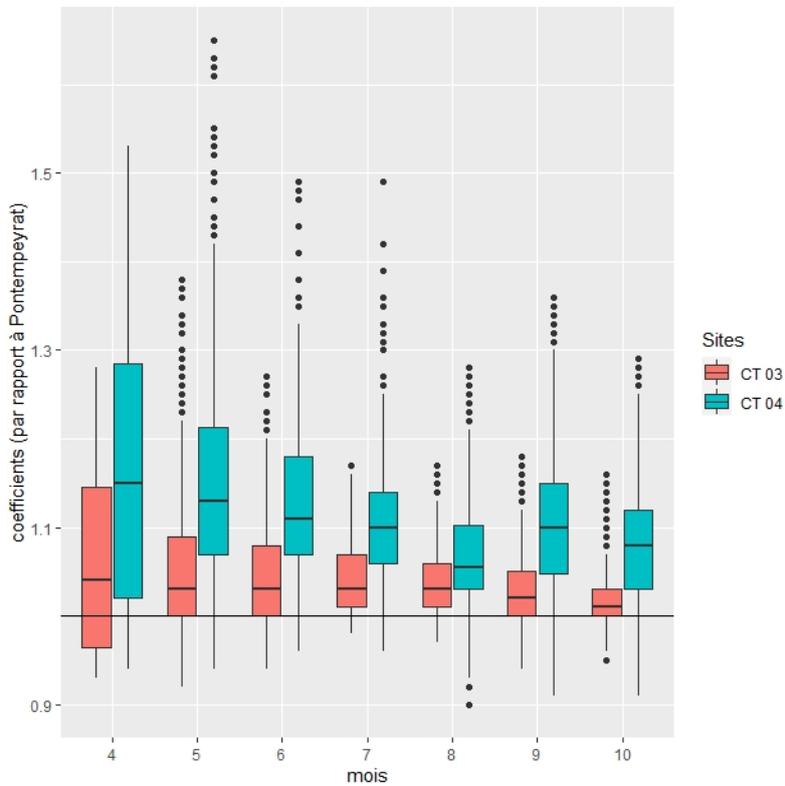


Figure 11 : Variation du coefficient de conversion de la température des stations CT03 et CT04 par rapport à Pontempeyrat

La situation au point CT04 (le plus en aval) est critique au regard des exigences de la truite fario. La moitié du mois de juillet possède une température de l'eau au-delà du seuil de confort de la truite fario (sans toutefois atteindre la température de létalité) (Figure 12).

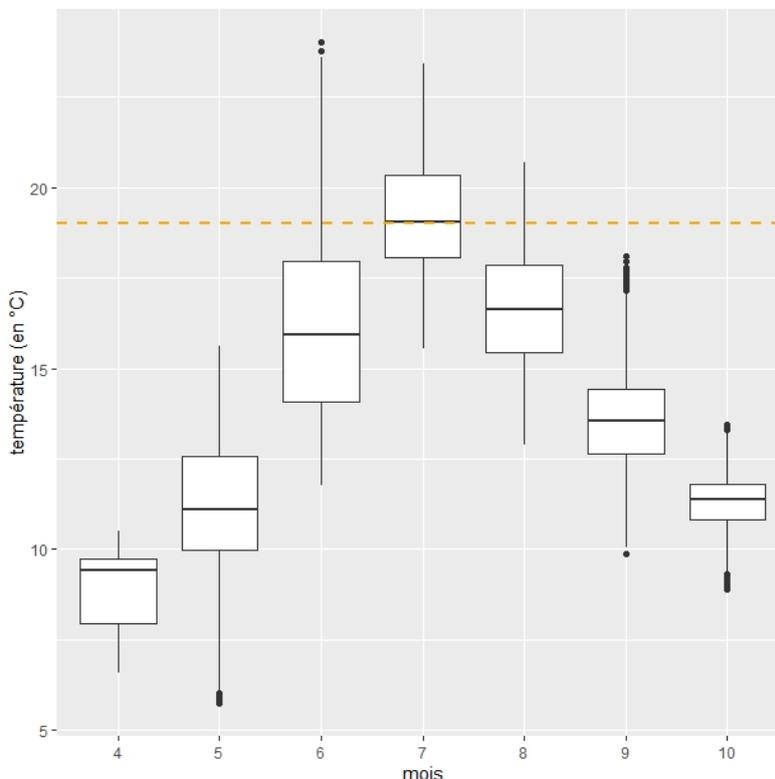


Figure 12 : Variation de température sur le point CT04 entre avril et octobre 2019 (la ligne en pointillés orange représente la limite de température de confort de la truite perlière)

1.3. Discussion

Les variations de températures sur un même site peuvent être conséquentes et sur des pas de temps courts comme cela a été constaté en juin 2019. Ces situations compliquent très probablement les conditions de vie des organismes concernés dont les éventuelles muettes perlières situées dans les gorges de l'Ance.

En outre, les températures de l'eau en zone aval sont élevées au regard des exigences de la truite fario sans toutefois atteindre le seuil de létalité de celle-ci (25°C). On notera néanmoins que le pic de chaleur de juin 2019 l'a frôlé avec une température qui a atteint 24,02°C le 30/06/2019. Ces pics de chaleur pourraient avoir un effet léthal sur nombre d'organismes incluant la truite et éventuellement la muette perlière. Ainsi, une mortalité brutale et conséquente pourrait survenir dans les années à venir et avec un risque croissant.

Les températures moyennes annuelles affichent une forte progression ($+0,71 \pm 0,05^\circ\text{C}$ pour par décade entre 2009 et 2020). Cette progression est supérieure au changement de température à la surface du sol à l'échelle planétaire constatée à $+ 0,27^\circ\text{C}$ par décade (HANSEN *et al.*, 2022). Le réchauffement de l'Ance est 2,6 fois plus rapide.

L'examen des variations mensuelles au cours de cette période fait ressortir une augmentation particulièrement marquée pour le mois de février ($+ 2,42 \pm 0,06^\circ\text{C}$ par décennie). Cette très forte augmentation est possiblement liée à la régression de l'albédo du sol en raison de la régression de

période de neige. Cela aurait potentiellement un effet démultiplicateur du réchauffement atmosphérique sur l'eau à cette période en particulier. Il est probable que ce soit la même situation pour le mois de décembre qui connaît lui aussi une augmentation importante ($+1,43 \pm 0,07^{\circ}\text{C}$ par décennies) mais toutefois moindre que celle de février. Aussi, il serait intéressant de tester cette hypothèse.

En outre, l'augmentation plus importante du mois d'août ($1,31 \pm 0,05^{\circ}\text{C}$) par rapport à juillet ($+0,87 \pm 0,05^{\circ}\text{C}$) est probablement lié aux étiages de plus en plus marqués en août et qui là encore ont un effet conjugué à l'élévation de la température atmosphérique.

Le réchauffement régulier de l'eau aux mois de juillet-août risque de continuer à altérer la population de truite fario, poisson-hôte de la moulette perlière. Certes, il a été constaté que le nombre d'heures avec une température de l'eau de plus de 19°C n'augmentait pas significativement, soulignant l'importance de plus en plus prononcée des pics de chaleur, mais cette situation ne devrait pas perdurer encore longtemps avec le réchauffement généralisé. Ces pics de chaleur peuvent éventuellement atteindre le métabolisme des truites, mais ne semblent, *a priori*, pas constituer le premier facteur d'altération du recrutement de la truite.

Enfin, la diminution de la température du mois de novembre paraît surprenante. Mais elle est possiblement en lien avec une accentuation des phénomènes de type cévenoles et qui viennent baisser la température par le volume d'eau conséquent (en tout cas croissant). Là encore, cette hypothèse pourrait être intéressante à tester.

Ces élévations de températures et les risques qu'elles font encourir à toute la faune dulçaquicole soulignent l'intérêt de bien veiller à ne pas contribuer plus à l'augmentation de la température de l'eau localement. Cela passe par la constitution d'une ripisylve la plus continue possible. Une récente publication propose même de constituer des ripisylves de 50 m de large afin d'obtenir le maximum d'efficacité (GEORGES *et al.*, 2021). Toutefois, les auteurs n'ont pas cherché à apprécier l'efficacité d'une ripisylve moins large (50 m était la largeur minimale).

En outre, il paraît utile d'éliminer autant que faire se peut les ouvrages de type seuils qui accumulent l'eau stagnante dans des portions parfois trop larges pour ne pas être abritées par la ripisylve. Par ailleurs, l'oxygénation liée à l'eau courante permet de palier *a minima* à l'élévation de température. Enfin, une mise en défens des ripisylves au niveau des pâtures pour éviter que les bovins en particulier viennent abrutir les jeunes arbres semble aussi utile. Cela permet une régénération des arbres et donc une continuité temporelle.

2. Autres variables physico-chimiques

2.1. Méthodologie

Eurofins a relevé différentes variables lors de 2 périodes de passage : 2014-2015 et 2019-2020 et sur 10 stations. A chaque relevé, 15 variables ont été mesurées (Tableau 4). 6 relevés ont été effectués depuis mars jusqu'à octobre de chacune des années concernées. Cela représente donc 3 600 données.

Tableau 4 : Liste des variables physico-chimiques relevées

Liste des variables physico-chimiques
Turbidité
pH
Conductivité à 25°C
Matières en suspension
Concentration en oxygène dissous
Taux de saturation en oxygène dissous
DBO5 à 20°C
DCO
Azote Kjeldahl
Ammonium
Nitrites
Nitrates
Phosphore total
Orthophosphates
Carbone Organique Dissous

Certaines données de 2014-2015 ont été légèrement transformées afin de pouvoir les représenter graphiquement et tester des tendances (Tableau 5).

Tableau 5 : Modifications de valeurs de différentes variables pour les relevés de 2014-2015

Variables	Valeur initiale	Valeur finale
Nitrites	<0,03	0,02
Phosphore total	<0,03	0,02
Ammonium	<0,05	0,04
Orthophosphates	<0,1	0,09
DBO5 à 20°C	<0,5	0,4
Azote Kjeldahl	<0,5	0,4
Carbone Organique Dissous	<0,5	0,4
Nitrites	<0.03	0,02
Phosphore total	<0.03	0,02
Ammonium	<0.05	0,04
Orthophosphates	<0.1	0,09
Azote Kjeldahl	<0.5	0,4
Nitrates	<1,0	0,9
Matières en suspension	<2	1
DBO5 à 20°C	<3	2
DCO	<5	4

Par ailleurs, parmi ces variables, certaines possèdent des valeurs limitatives voire maximales pour la moulette perlière selon SIMON *et al.* (non daté).

Tableau 6 : Valeurs limitatives de la moulette perlière selon Simon *et al.* (non daté)

Variables	Valeurs optimales
pH	6,0 – 7,1
Conductivité	70 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ (maximum 80 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$)
DBO ₅	< 1,5 mg/L
NO ³⁻	< 2,5 mg/L

Les stations se situent sur le bassin versant de l'Ance du nord sur la rivière de l'Ance mais aussi sur certains affluents (Figure 13). La situation des stations au regard de la présence de moulettes est variable et est reprise dans le Tableau 1. Ce sont les mêmes que celles de la partie Température de l'eau.

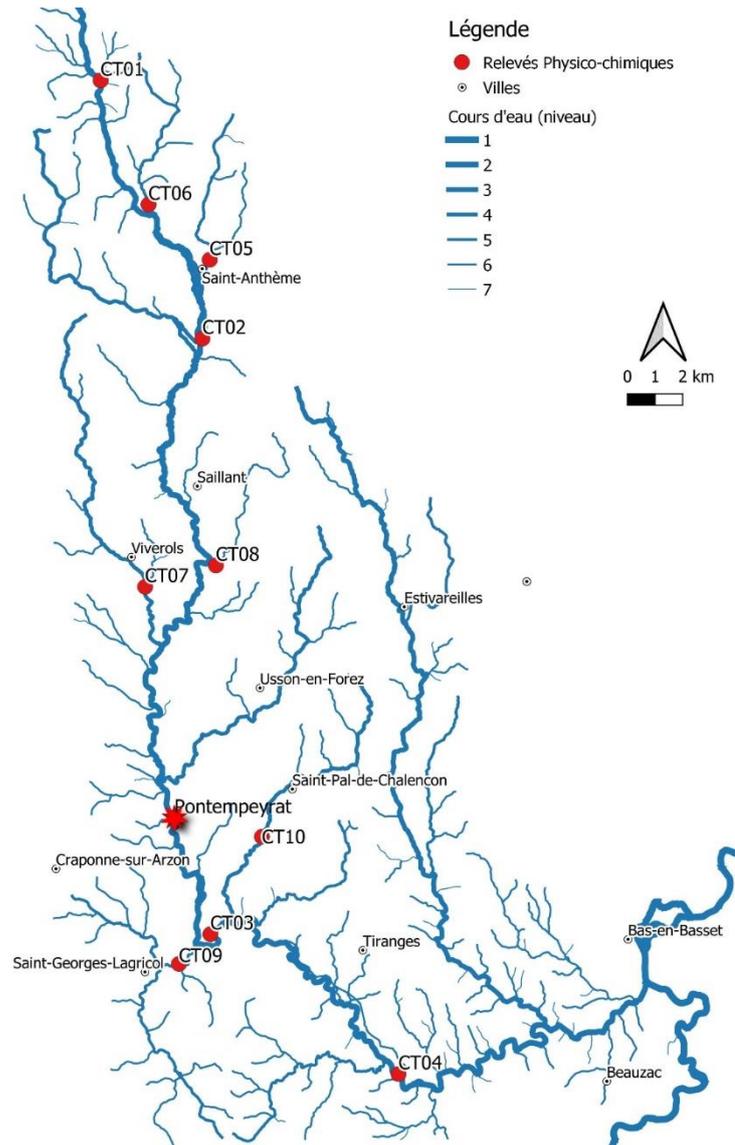


Figure 13 : Localisation des stations de relevés physico-chimiques par Eurofins

L'analyse a consisté à comparer les données de 2014-2015 et 2019-2020 dans un premier temps par une Analyse de Composante Principale (ACP) puis les variables une à une. Pour ce faire un modèle linéaire généralisé a été mis en œuvre à partir des valeurs de la variable concernée en fonction du temps. En outre, afin de comparer les stations entre elles, une ACP a été effectuée avec comme variable les stations. La différenciation des groupes de stations repose alors sur un test de Tuckey portant sur la contribution sur l'axe 1 (le plus discriminant de l'ACP).

Enfin, dans le but d'avoir une idée de l'évolution à plus long terme des évolutions de certaines variables, le portail internet *naïade* a été consulté (le 18/11/2021). Il intègre les données issues du réseau de surveillance de la qualité des eaux. Les variables retenues sont celles ayant une variation significative entre les 2 périodes de suivi d'Eurofins (2014-2015 et 2019-2020) et celles étant reconnues comme ayant un effet sur la survie de la muette (Tableau 6). La station de relevés est située à Sauvessanges (code 04003645) et les données ont été acquises à partir du 29/01/2007. Entre 6 et 13 relevés ont été effectués par an (moyenne de 10). Ce sont au total 129 dates de relevés pour chacune des variables.

2.2. Résultats

L'analyse de correspondance principale portant sur les périodes 2014-2015 versus 2019-2020 ne fait pas ressortir de différences significatives entre chacune des périodes (Figure 14).

L'analyse des stations reposant sur l'analyse de composante principale fait ressortir 2 groupes significativement différents (par la projection des groupes sur l'axe 1 de l'ACP) (Tableau 7). Ainsi, les groupes avec mulettes et situations inconnues sont similaires entre eux (groupe B dans le *Tableau 8*) et différent du groupe des localités sans mulette qui est isolé (groupe A dans le *Tableau 7*).

La contribution des variables à la discrimination est très variable. Il ressort que hiérarchiquement, la conductivité, la saturation en oxygène dissous, le pH, la concentration en oxygène dissous, et celle en phosphore total occupent un rôle important (Tableau 8).

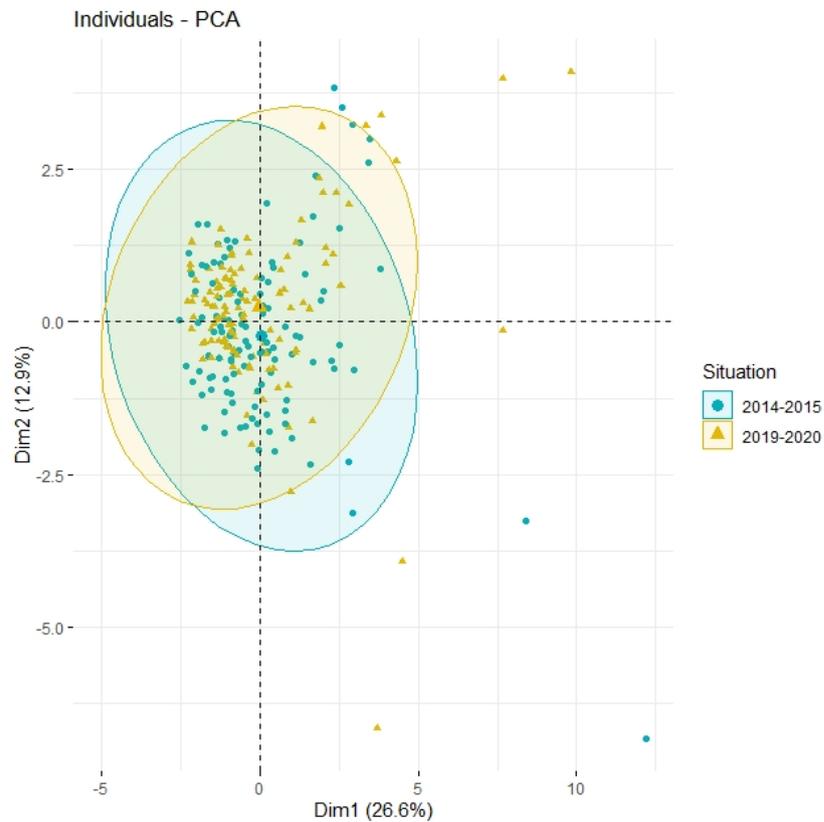


Figure 14 : Représentation graphique de l'analyse de composantes principales des variables physico-chimiques en fonction des périodes (2014-2015 et 2019-2020).

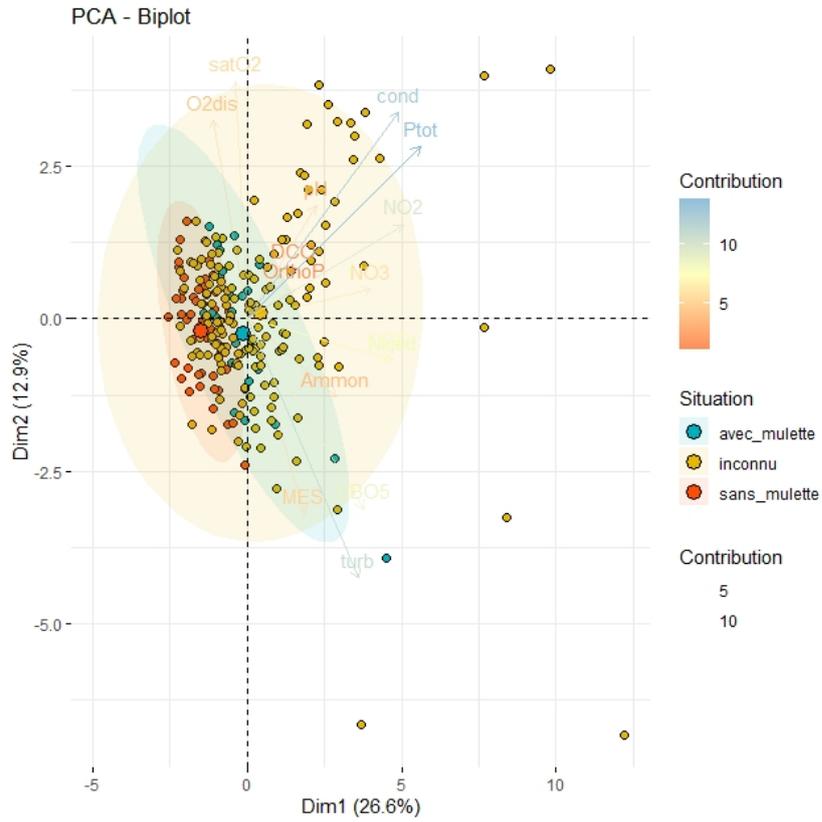


Figure 15 : Représentation graphique de l'analyse de composantes principales des variables physico-chimiques en fonction de la situation au regard de la moulette perlière.

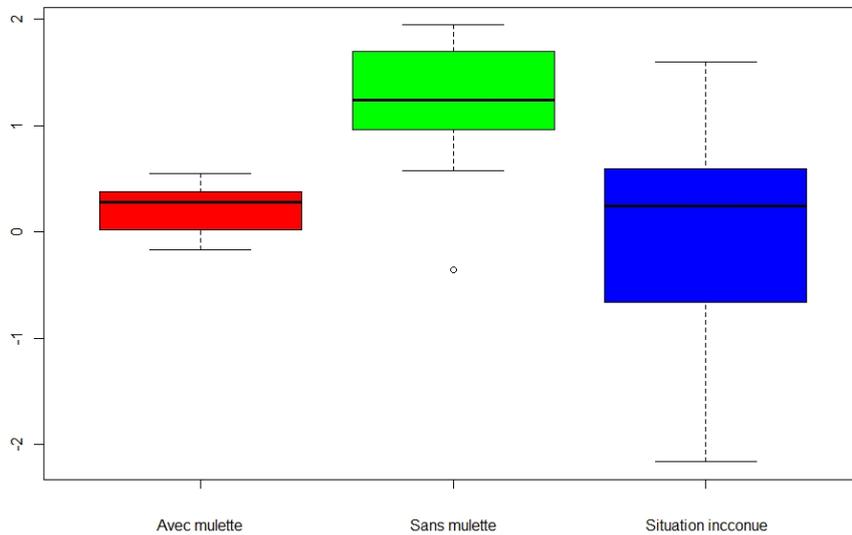


Figure 16 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe de l'ACP en fonction des situations au regard de la moulette perlière

Tableau 7 : Différentiation des groupes statistiques significativement différents suivant le test de Tuckey portant sur la projection sur l'axe 1 de l'ACP

Avec mulettes perlières	Sans moulette perlière	Situation inconnue
	A	
B		B

Tableau 8 : Contribution des variables physico-chimiques à la discrimination entre les différentes situations au regard de la situation de la mulette perlière

Variables	Contribution relative sur le premier axe de l'ACP	
	En valeur relative	En valeur absolue
Conductivité	-98,7	98,7
Saturation en oxygène dissous	89,99	89,99
pH	84,26	84,26
Oxygène dissous	82,65	82,65
Phosphore total	-35,02	35,02
Demande Biologique en Oxygène	10,71	10,71
Matière en suspension	10,11	10,11
Demande Chimique en Oxygène	10,04	10,04
Nitrites	-8,15	8,15
Azote Kjeldhal	6,16	6,16
Nitrates	-6,09	6,09
Turbidité	5,41	5,41
Carbone organique dissous	2,78	2,78
Orthophosphate	2,3	2,3
Ammonium	-0,03	0,03

Fort de ce constat, une analyse plus fine des groupes (en excluant les stations CT01 et CT02 où la mulette perlière est absente) permet ainsi de rapprocher les stations dont la situation est inconnue au regard de la mulette perlière de celle où la mulette perlière est présente (Figure 17 et Figure 18). Ainsi, la projection sur le premier axe de l'ACP fait ressortir 4 groupes différents. Le groupe où la mulette est présente (comprenant la station CT03) comprend CT04, CT07 et CT08 (groupe B du Tableau 9). Les stations concernées se trouvent sur la partie aval de l'Ance (dans les gorges, en aval du barrage de Passouira), sur la Ligonne et sur le Saillantet (Figure 19). Ces stations du fait de leur proximité suivant les critères physicochimiques avec celle où la mulette perlière est présente (CT03) possèdent un potentiel d'accueil de l'espèce.

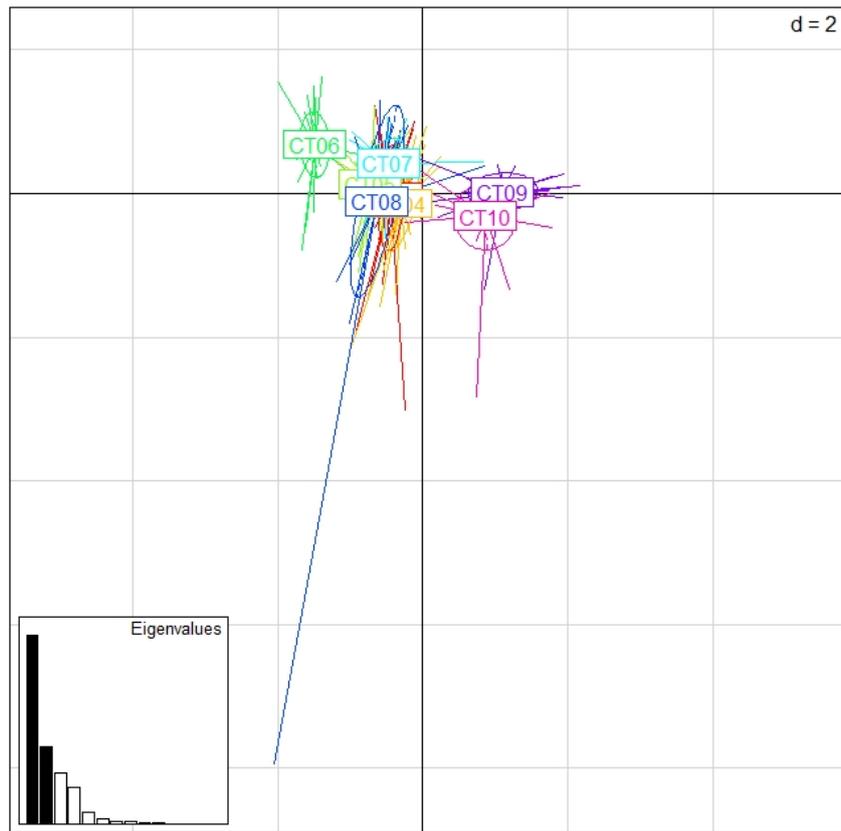


Figure 17 : Représentation graphique de l'analyse de composantes principales des variables physico-chimiques en fonction des stations

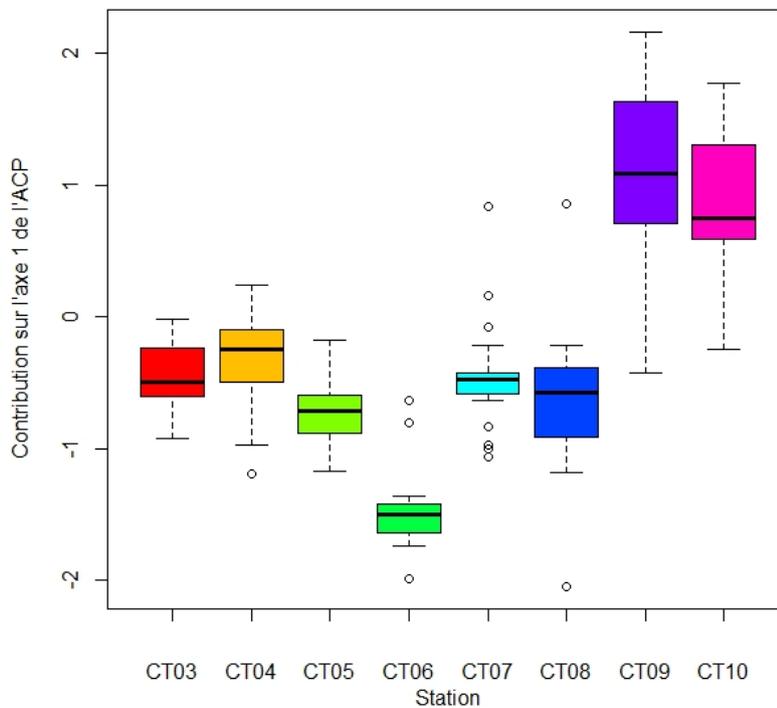


Figure 18 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP en fonction des stations

Tableau 9 : Différentiation des groupes de stations significativement différentes suivant le test de Tuckey portant sur la projection sur l'axe 1 de l'ACP

CT03*	CT04	CT05	CT06	CT07	CT08	CT09	CT10
						A	A
B	B			B	B		
C		C		C	C		
			D				

* station où la mulette perlière est présente

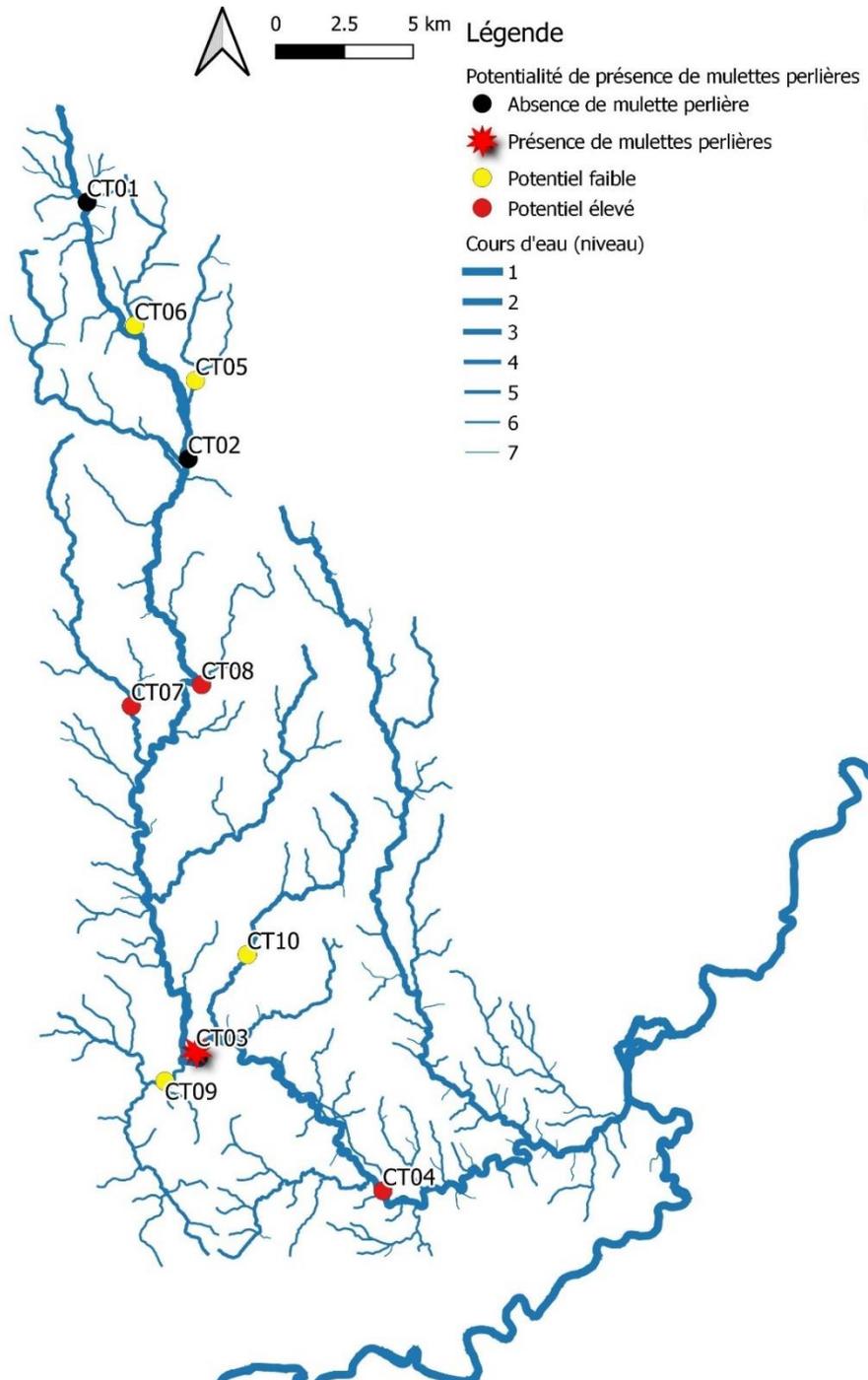


Figure 19 : Potentialité de présence de la mulette perlière en fonction des analyses physico-chimiques

Prises une à une, les différentes variables n'ont pas toutes connu des variations significatives. Ainsi, celles qui ont fait l'objet d'une analyse détaillée sont celles avec une diminution ou une augmentation significative et/ou qui possèdent un référentiel pour la moulette perlière (selon SIMON *et al.*, non daté) : le pH, la conductivité, la Demande Biologique en Oxygène en 5 jours et la concentration en nitrates (Tableau 6 et Tableau 10). Les variables pour lesquelles aucune tendance n'a été décelée ont fait l'objet d'une représentation graphique présentée en annexe 3.

Tableau 10 : Valeurs moyennes et évolution des différentes variables physico-chimiques entre 2014-2015 et 2019-2020

Liste des variables physico-chimiques	Moyenne et borne de l'intervalle de confiance		Tendance annuel avec intervalle de confiance si significatif (GLM)	Données du réseau de surveillance de la qualité de l'eau (portail naïade, consulté le 18/11/2021)
	2014-2015	2019-2020		
Turbidité (en NFU)	3,363 (2,825 ; 3,901)	3,246 (2,617 ; 3,847)	NS*	-
pH	6,911 (6,831 ; 6,990)	7,355 (7,289 ; 7,421)	+ 0,08 (± 0,01)	7,261 (7,202 – 7,321)
Conductivité à 25°C (en µS/cm ²)	89,74 (75,71 ; 103,77)	90,98 (77,81 ; 104,14)	NS*	57,63 (55,83 ; 59,42)
Matières en suspension (en mg/L)	4,5 (3,771 ; 5,229)	6,789 (5,026 ; 8,570)	NS*	-
Concentration en oxygène dissous (en mg/L)	9,558 (9,340 ; 9,777)	9,903 (9,724 ; 10,084)	NS*	-
Taux de saturation en oxygène dissous (en %)	88,854 (87,628 ; 90,080)	99,273 (98,355 ; 100,191)	+ 1,91 (± 0,16)	96,938 (95,618 ; 98,259)
DBO5 à 20°C (en mg/L)	1,669 (1,475 ; 1,863)	1,339 (1,210 ; 1,468)	-0,094 (± 0,023)	1,073 (0,953 ; 1,193)
DCO (en mg/L)	12,241 (10,600 ; 13,881)	12,917 (11,079 ; 14,754)	NS*	-
Azote Kjeldahl (en mg/L)	0,628 (0,556 ; 0,700)	0,618 (0,571 ; 0,665)	NS*	-
Ammonium (en mg/L)	0,088 (0,061 ; 0,114)	0,083 (0,048 ; 0,119)	NS*	-
Nitrites (en mg/L)	0,030 (0,024 ; 0,035)	0,033 (0,021 ; 0,045)	NS*	-
Nitrates (en mg/L)	4,126 (3,586 ; 4,665)	4,924 (3,497 ; 6,350)	NS*	3,491 (3,197 ; 3,784)
Phosphore total (en mg/L)	0,090 (0,075 ; 0,104)	0,080 (0,060 ; 0,100)	NS*	-
Orthophosphates (en mg/L)	0,164 (0,129 ; 0,200)	0,149 (0,107 ; 0,191)	NS*	-
Carbone Organique Dissous (en mg/L)	5,227 (4,722 ; 5,812)	5,267 (4,722 ; 5,812)	NS*	-

*NS= non significatif

➤ pH

Le pH a connu une augmentation importante et significative (de près de 0,08 par an) (Tableau 10 et Figure 20). En 2019-2020, 91 relevés étaient au-dessus de la limite de tolérance de la moulette perlière contre 39 pour 2014-2015. Toutes les stations sont concernées par une hausse significative à l'exception des stations CT09 et CT10 situées respectivement sur le Lembron et sur le Chandieu (Figure 19 et Tableau 11).

Tableau 11 : Coefficient directeur et intervalle de confiance des modèle linéaires généralisés basé sur la variation du pH, di taux d'oxygène dissous de et la DBPO5 en fonction des années

Stations	pH	Taux de saturation en oxygène	DBO5
	Coefficient directeur de la pente ± intervalle de confiance*		
CT01	0.122 ± 0.032	2.2 ± 0.52	-0.11 ± 0.04
CT02	0.086 ± 0.027	1.84 ± 0.43	-0.05 ± 0.05
CT03	0.067 ± 0.025	1.21 ± 0.64	-0.11 ± 0.06
CT04	0.080 ± 0.038	0.65 ± 0.56	-0.11 ± 0.06
CT05	0.095 ± 0.028	0.089 ± 0.58	-0.06 ± 0.05
CT06	0.090 ± 0.026	0.29 ± 0.60	-0.06 ± 0.06
CT07	0.078 ± 0.026	1.02 ± 0.59	-0.09 ± 0.09
CT08	0.104 ± 0.030	-0.67 ± 0.58	-0.07 ± 0.05
CT09	0.021 ± 0.031	-1.21 ± 0.76	-0.13 ± 0.07
CT10	0.053 ± 0.027	1.4 ± 0.54	-0.15 ± 0.13

*en gras si significatif au seuil de 5 %

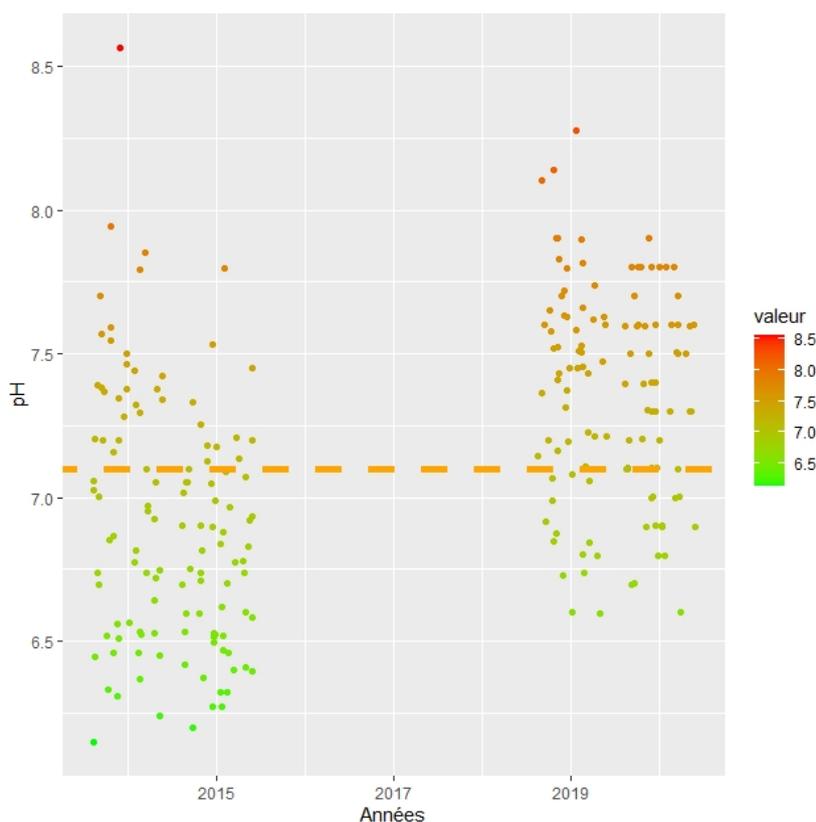


Figure 20 : Variation de valeur de pH entre 2014-2015 et 2019 -2020 (la ligne pointillée orange indique la limite maximale de tolérance de la moulette perlière : ph de 7,1)

Une saisonnalité marquée a été constatée avec des valeurs élevées en début d'année et surtout un pic vers le 140^{ème} jour de l'année (vers la fin mai) en 2014 et 2015 (Figure 21).

Toutefois, depuis 2007 jusqu'à 2021, le pH a significativement baissé de 0,032 unités ($\pm 0,007$) par an. Plus en détail, le pH moyen tout comme la dispersion de celui-ci ont baissé jusqu'en 2012 environ (Figure 22). Depuis, on assiste à une légère augmentation. Mais les valeurs moyennes sont restées très longtemps supérieures au seuil de tolérance de la moulette perlière (7,1 selon SIMON *et al.*, non daté). Seule une période de 2014 à 2017 s'approchait de valeurs favorables.

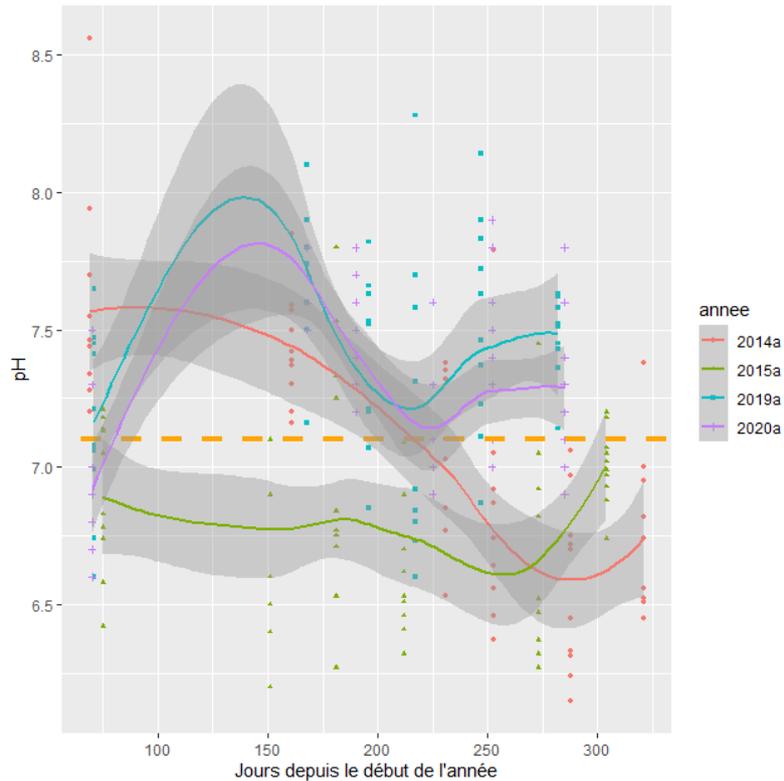


Figure 21 : Variation au cours l'année du pH et suivant les années la ligne pointillée orange indique la limite maximale de tolérance de la moulette perlière : ph de 7,1)

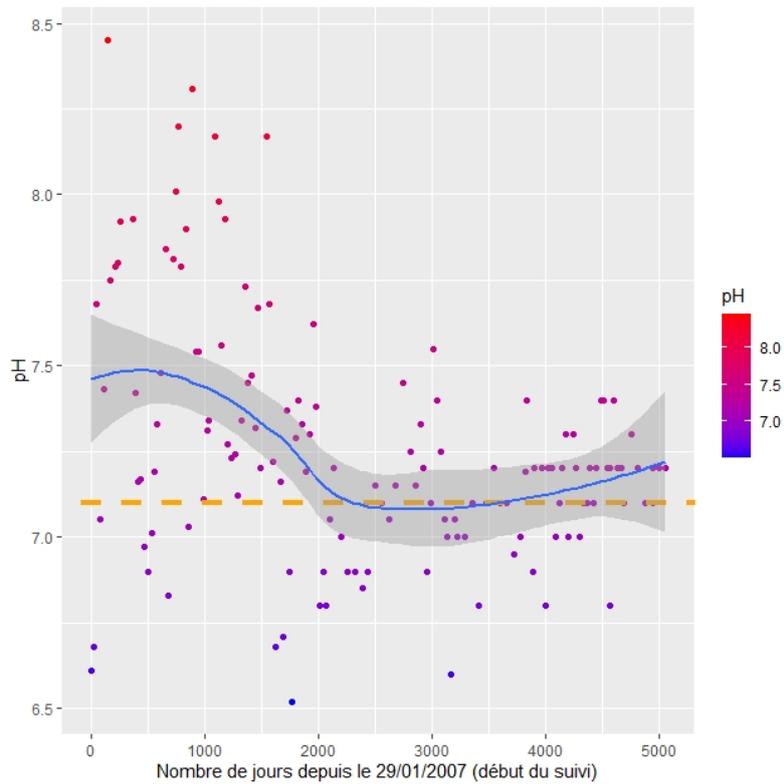


Figure 22 : Variation du pH et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021) la ligne pointillée orange indique la limite maximale de tolérance de la moulette perlière : ph de 7,1)

➤ Conductivité

Selon SIMON *et al.* (non daté), la conductivité serait un facteur limitant pour la moulette perlière avec un niveau de confort située en dessous de $70 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ et un seuil de tolérance de $80 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ (à température constante). Cette variable renseigne la charge en ions de l'eau. Entre la période de 2014-2015 et 2019-2020, aucune différence significative n'a été constatée. Il en est de même depuis 2007 à Sauvessanges.

On notera que les moyennes de la conductivité entre 2014-2015 et 2019-2020 dépassent régulièrement la valeur maximale de tolérance de la moulette perlière (de l'ordre de $90 \mu\text{S}/\text{cm}^2$).

Depuis 2007, il n'est pas constaté de variation significative tant à la hausse qu'à la baisse. On notera toutefois que les valeurs au-dessus des valeurs maximales de tolérance sont aussi fréquentes.

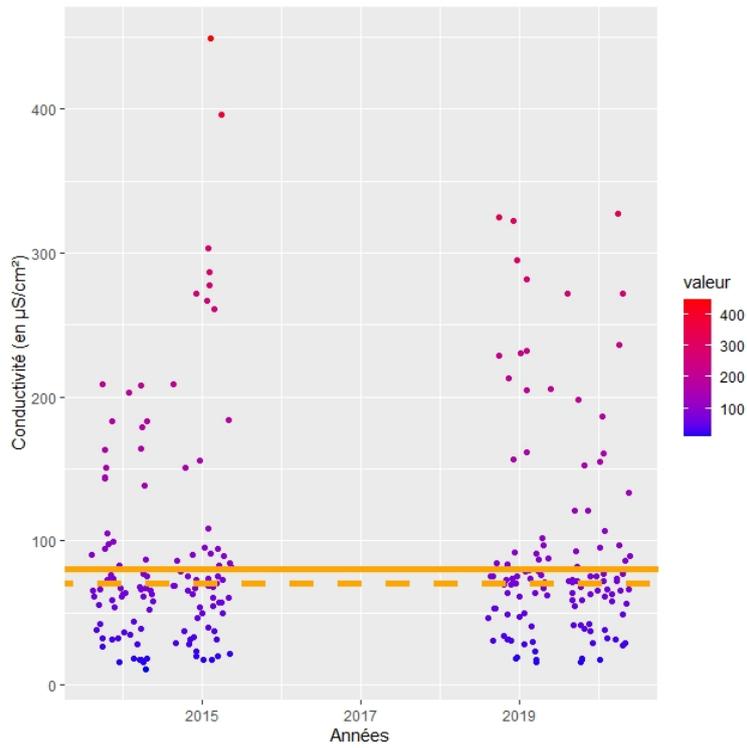


Figure 23 : Variation de la conductivité entre 2014-2015 et 2019 -2020 (la ligne pointillée orange indique la limite de tolérance de la moulette perlière et la ligne continue la valeur maximale)

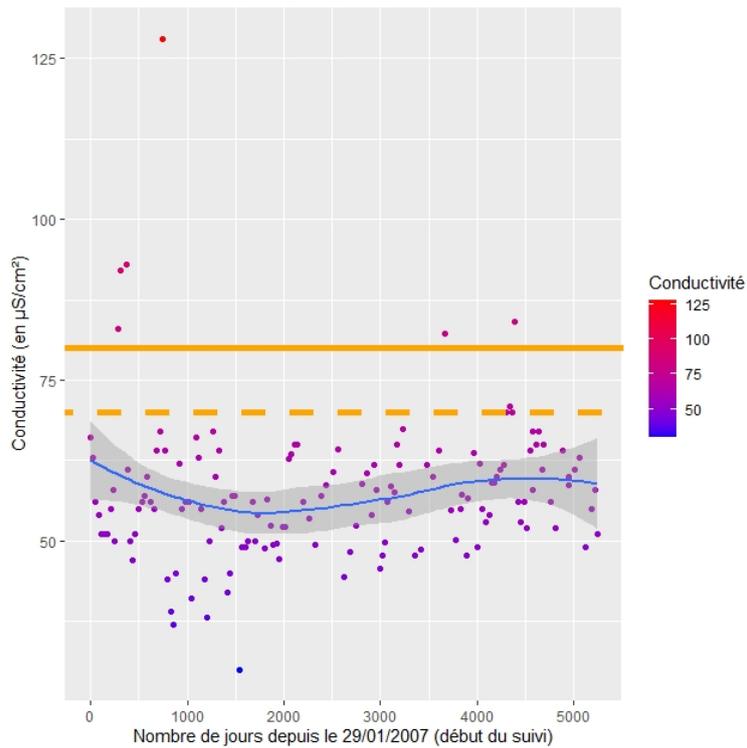


Figure 24 : Variation de la conductivité et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021) (la ligne pointillée orange indique la limite de confort de la moulette perlière et en continue la limite maximale de tolérance)

➤ *Taux de saturation en Oxygène dissous*

Le taux de saturation en oxygène a aussi connu une progression entre la période 2014-2015 et 2019-2020 avec une augmentation significative de 1,91 % ($\pm 0,16$) par an (Tableau 10 et Figure 25). Toutefois, l'augmentation du taux de saturation n'est pas significative partout. Elle ne l'est que sur les stations CT01, CT02, CT03 et CT10 (soit sur l'Ance en partie amont du barrage de Passouira et sur le Chandieu ; Tableau 11).

Sur une plus longue période, les relevés de Sauvessanges illustrent une augmentation très nette depuis 2007 avec l'atteinte d'un plafond (probablement le maximum atteignable) vers 2014. Depuis, une légère diminution est constatée. Sur l'ensemble de la période, il affiche une progression significative de 1,02 % ($\pm 0,13$ %) par an.

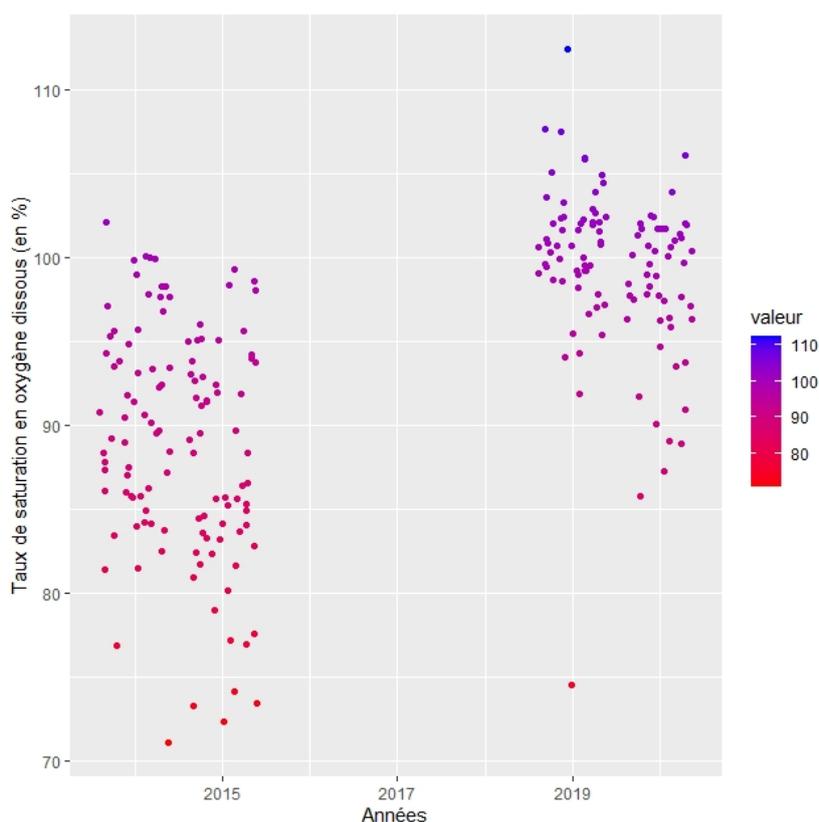


Figure 25 : Variation du taux de saturation en oxygène entre 2014-2015 et 2019-2020

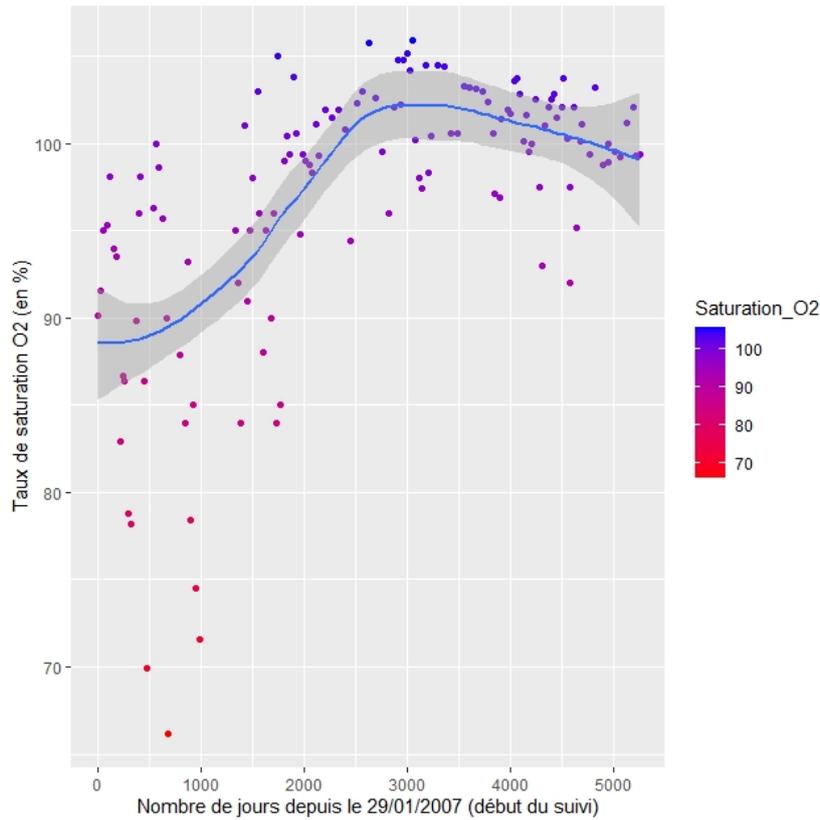


Figure 26 : Variation du taux de saturation en oxygène dissous et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naïades, consulté le 18/11/2021)

➤ *Demande biologique en Oxygène sur 5 jours (DBO5)*

La demande biologique en oxygène sur 5 jours a régressé significativement de près de 0,1 mg/L et par an, passant en moyenne de 1,669 mg/L en 2014-2015 à 1,339 mg/L en 2019-2020 (Tableau 10 et Figure 27). Cette situation semble être liée à des valeurs extrêmement élevées qui n'ont pas été retrouvées sur la période 2019-2020. Plus précisément, seule la station CT01 (amont de l'Ance) a connu une baisse significative (Tableau 11).

Sur une période plus longue (de 2007 à 2021), il n'est pas constaté de tendance significative. Sur cette période, la moyenne est de 1,07 mg/L (comprise entre 0,95 et 1,19 mg/L sur l'intervalle de confiance de 95 %) (Tableau 10). Pour autant, les valeurs hautes tendent à diminuer (Figure 28).

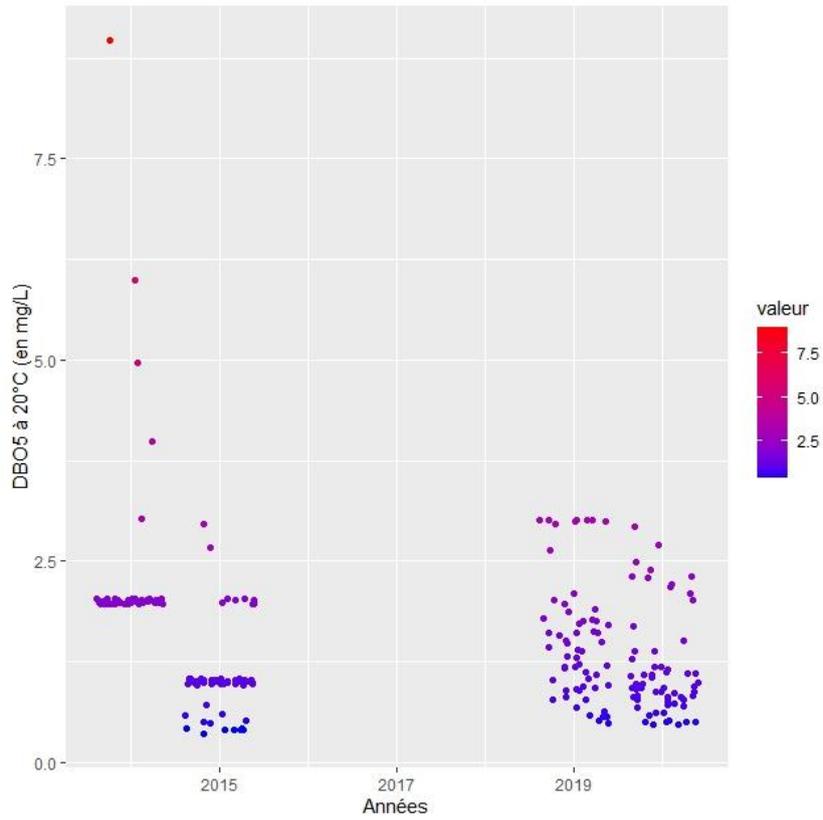


Figure 27 : Variation de la demande biologique en oxygène sur 5 jours entre 2014-2015 et 2019-2020

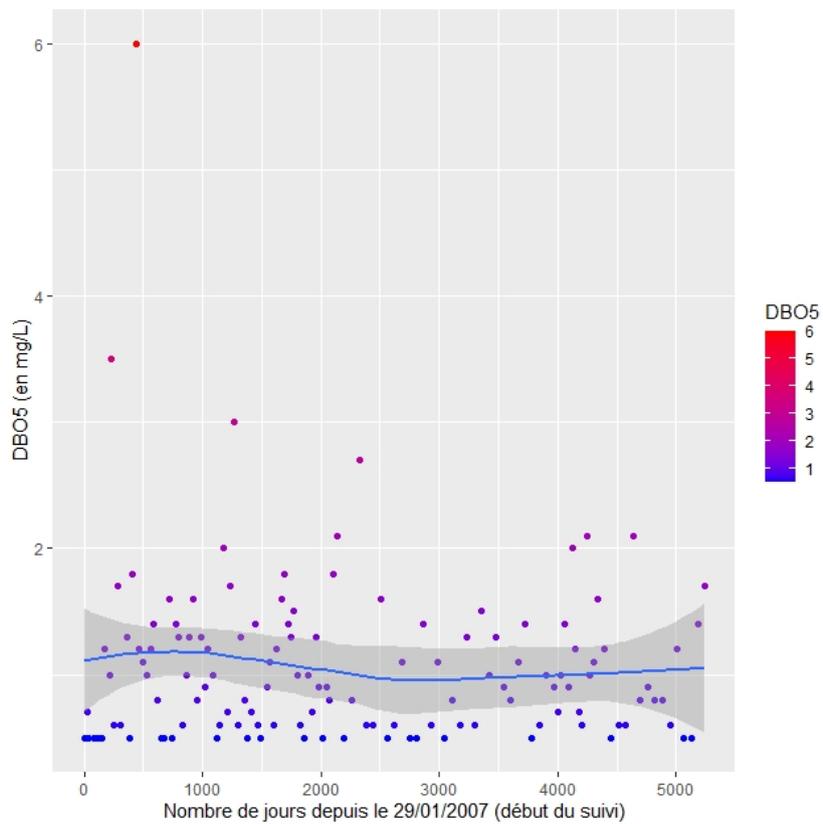


Figure 28 : Variation de la DBO5 et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naïades, consulté le 18/11/2021)

➤ *Nitrates*

La variation du taux de nitrates n'a pas évolué significativement entre les 2 périodes d'étude avec une moyenne autour de 3,5 (depuis 2007) à 5,5 mg/L (sur la période 2014-2015 à 2019-2020) (Tableau 10 et Figure 29). Il en est de même sur la période allant de 2007 à 2021 sur le site de Sauvessanges (Figure 30). Par ailleurs, bien que peu élevées, les valeurs sont quasiment systématiquement au-dessus du maximum toléré par la moulette perlière (2,5 mg/L selon Simon et al., non daté). En outre, il n'a pas été détecté de tendances saisonnières (avec un pic après les apports d'effluents sur les surfaces agricoles par exemple).

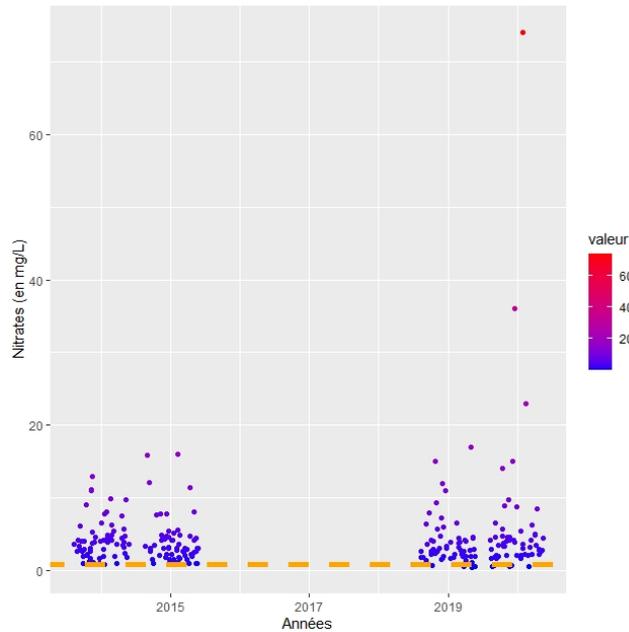


Figure 29 : Variation du taux de nitrates entre 2014-2015 et 2019-2020 (la ligne en pointillés représente la teneur maximale tolérée par la moulette perlière)

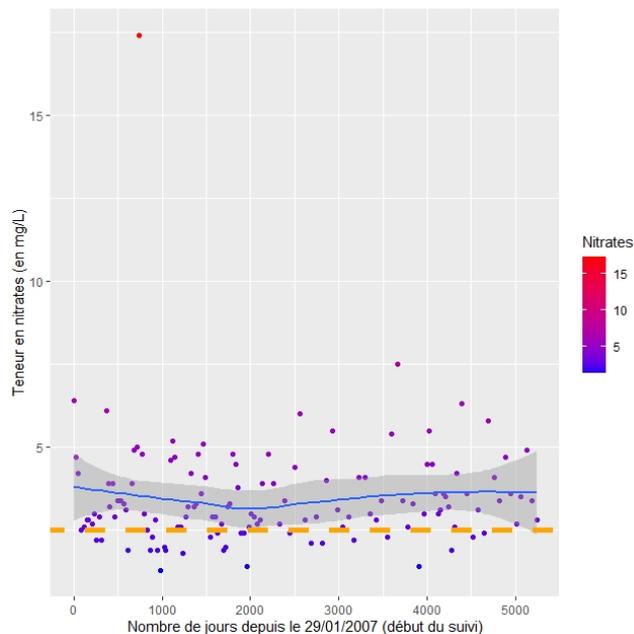


Figure 30 : Variation du taux de nitrates et courbe de tendance à la station de surveillance de la qualité des eaux de Sauvessanges (site de Naiades, consulté le 18/11/2021) (la ligne en pointillé représente la limite maximale de tolérance de la moulette perlière)

2.3. Discussion

L'identification de portions de cours d'eau présentant un potentiel pour la moule perlière au regard des analyses physico-chimiques est intéressante. Elle permet de mieux cibler les prospections futures. Celles-ci pourront éventuellement s'effectuer par une recherche classique à l'aide d'un Bathyscope ou par une recherche à plus grande échelle grâce à l'ADN environnemental. Ainsi, l'Ance en aval de Passouira, la Ligonne et le Saillantet semblent être à cibler en priorité au regard des critères physico-chimiques. Toutefois, il est à noter que cette approche certes intéressante ne repose que sur une station où la moule perlière est présente. Ainsi, des réserves importantes doivent être émises quant à la robustesse de cette approche.

On notera aussi que les variables discriminantes sont la conductivité, la saturation en oxygène dissous, le pH, l'oxygène et le phosphore total. Toutefois, le phosphore total n'est pas la forme « biodisponible » du phosphore, ce sont plutôt les orthophosphates (qui créent des dystrophies du milieu). Le phosphore total mesure également le phosphore particulaire (plutôt « fixé » aux matières en suspension), et est donc très dépendant de l'hydrologie. A l'exception du pH, ces variables ne sont pas connues comme conditionnant la présence de la moule perlière. Un approfondissement de cette approche à plus large échelle (nationale voire globale) en incluant les données issues de stations de surveillance dans différents cas (population présente et disparues (voire fonctionnelles versus non fonctionnelles) permettrait possiblement d'identifier des variables discriminantes jusque-là sous-estimées.

L'augmentation significative et importante du **pH** est surprenante entre 2014-2015 et 2019-2020 (toute chose étant égale par ailleurs, y compris l'heure de la journée). Elle n'était pas suspectée et révèle une atteinte importante à l'habitat ainsi probablement qu'à la moule perlière (pH de 7,1, supérieur au seuil de tolérance connu). Il est difficile de définir avec certitude l'origine de cette variation de pH. Mais il est possible que cela soit lié à l'activité algale (suivant MOATAR *et al.*, 2009) et qui pourrait être liée à une eutrophisation accrue. A l'inverse, Les pH acides peuvent avoir plusieurs origines : pluies acides, lessivages de sols tourbeux et/ou prairies humides, ou de sols forestiers avec résineux, activité photosynthétique dans le cours d'eau (qui peut créer notamment des variations nyctémérales notables du pH), ou encore des rejets anthropiques. Le pic printanier de cette variable (Figure 21) est possiblement lié à une activité biologique particulière mais qui reste à déterminer. Les différences saisonnières et interannuelles de l'hydrologie, notamment sur un bassin versant présentant de nombreuses zones humides (prairies et tourbières), est aussi une variable potentiellement explicative des variations de pH observées ici.

La différence entre le nombre de relevés de pH au-dessus de la valeur maximale de tolérance de la moule perlière entre le suivi d'Eurofins et celui de Sauvessanges est probablement liée à des hausses très éphémères. Ceux-ci restent probablement plus inaperçus avec 10 relevés en moyenne par an.

La **conductivité** ne révèle pas de variations significatives tant sur un pas de temps court (2014-2015 à 2019-2020) que sur un pas de temps plus long (depuis 2007). L'existence de valeurs régulièrement supérieures au seuil de tolérance de la moule perlière lors des relevés de 2014-2015 et de 2019-2020 est possiblement liés aux emplacements choisis. Ces zones connaissent probablement des apports ioniques ponctuels et un peu plus conséquents et qui n'existeraient pas (ou peu) au niveau de la station de Sauvessanges. Ces quelques petites disparités seraient à mettre en lien avec une hétérogénéité spatiale. Cette variable reste à surveiller car elle peut être ponctuellement très élevée (pic à plus de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ pour un seuil de tolérance d'environ 80 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$).

L'augmentation du **taux de saturation de l'oxygène** au-delà de 100% révèle une sursaturation croissante dans le temps. Ce paramètre peut être extrêmement volatile sur un cycle nyctéméral, car il est très dépendant de la température de l'eau, de son brassage par les écoulements. Il peut aussi être lié à l'activité biologique du cours d'eau (augmentation du biofilm, des bryophytes et autres hydrophytes).

La diminution notable de la DBO5 révèle une diminution généralisée du taux de matière organique dans la rivière. Toutefois, elle n'est significative qu'entre les périodes 2014-2015 et 2019-2020 et cette régression est principalement le fruit de la diminution des pics. Cette situation ne révèle pas nécessairement la meilleure maîtrise des effluents tant domestiques que d'élevage. Cela peut être lié à l'amélioration des performances analytiques et à l'impact de l'hydrologie sur ce paramètre. En effet, 2014 a été une année particulièrement humide même en début de période estivale, et les valeurs les plus élevées de cette même année sont très certainement corrélées avec l'hydrologie (que ce soit lié à un flux naturel de la DBO5, ou à un dysfonctionnement local du réseau d'assainissement comme un by-pass en surcharge). Il est donc délicat de dresser une tendance nette sur ce paramètre entre les deux périodes. Par ailleurs, à l'échelle des stations, seule celle située complètement en amont sur l'Ance (CT01) possède une régression significative sur la période 2014-2015 à 2019-2020. En raison de l'absence d'habitation en amont, il est fort probable que cette diminution soit liée à un changement de pratiques agricoles. Cependant, les pratiques agricoles sont assez peu génératrices de flux de BDO₅ vers les cours d'eau, car assez diffuses sauf accident : épandage de lisiers à proximité directe d'un cours d'eau, ou d'une cuve qui fuie/déborde, etc. Les élévations de DBO5 (valeurs alors supérieures à 5mg/L) sont majoritairement associées à des rejets ponctuels type station d'épuration.

Enfin, la teneur en **nitrites** n'a pas significativement évolué suivant les différentes échelles temporelles étudiées. Son taux moyen de 3,5 à 5,5 mg/L est certes faible en comparaison avec des localités où les activités et les densités humaines sont plus importantes. Toutefois, il reste supérieur au seuil de tolérance de 2,5 mg/L de la muette perlière selon SIMON *et al.* (non daté). Mais il demeure très inférieur au taux de létalité pour 10 % des individus au bout de 10 jours (entre 288 et 293 mg/L) (BELAMY *et al.*, 2022).

En conclusion sur les aspects physico-chimiques, il est possible qu'il y ait une légère dégradation de la qualité des eaux au regard des exigences de la muette perlière par une activité photosynthétique plus élevée (algale, et liée aux macrophytes aquatiques). Cette progression végétale est possiblement liée au colmatage et/ou à la stabilité sédimentaires accrus en certaines localités et qui permettent l'ancrage et la croissance des macrophytes et/ou du biofilm. Ces hypothèses restent toutefois difficiles à confirmer. Les réels efforts fournis dans le cadre du contrat de rivière sont, à travers la grille de lecture des critères physico-chimiques, peu perceptibles et restent probablement très localisés.

3. Peuplement piscicole et Infection des truites

3.1. Méthodologie

La première analyse repose sur le **peuplement piscicole**. En effet, des pêches électriques ont été pratiquées sur 10 stations de façon la plus exhaustive (ATHOS Environnement, 2019). Ces pêches ont été effectuées entre le 02/08 et le 05/09/2019. Parmi les 10 stations échantillonnées, une se trouve sur une portion de l'Ance où la muette perlière est présente (VRIGNAUD 2018). 2 autres sont aussi sur l'Ance mais où la muette perlière n'est pas connue. Enfin, les 7 autres secteurs de pêche électrique sont situés sur des affluents où la situation est inconnue.

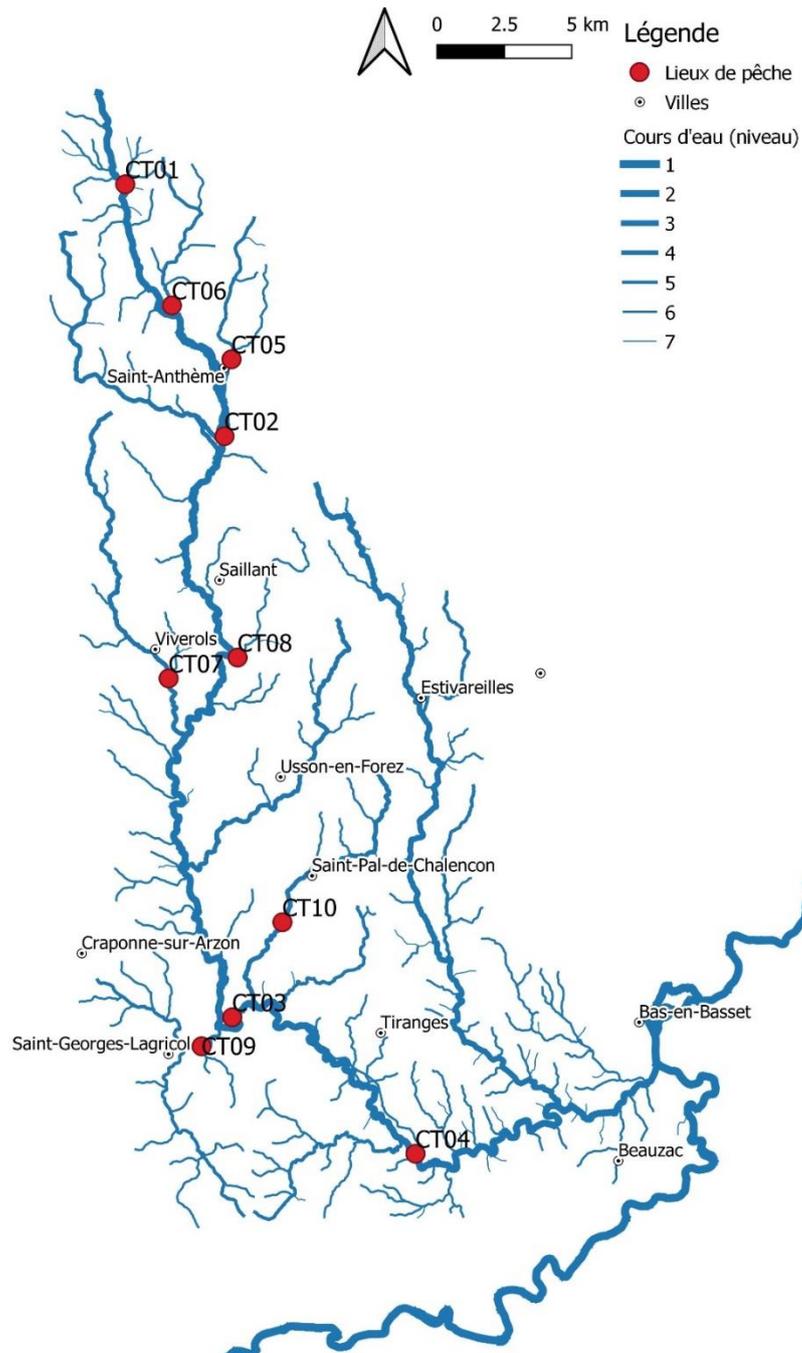


Figure 31 : Localisation des pêches électriques menées par Athos Environnement (2019)

Le peuplement retenu est la densité issue de l'addition des passages de pêches électriques divisée par la surface couverte. Cette densité est exprimée en nombre d'individus par mètre carré (annexe 1), mais aussi en masse (grammes) par mètre carré (annexe 2).

L'objectif de l'analyse du peuplement piscicole est d'apprécier les différences en fonction ou non de la présence de moulettes perlières. Pour ce faire, des analyses factorielles de correspondance ont été effectuées sur la masse et les effectifs. Pour apprécier les différences, un test interclasse a été effectué (test de Monte Carlo avec 999 répliques). La significativité a été appréciée au seuil de 95 %.

L'analyse de l'**infection des truites** a été effectuée à partir de la dernière pêche électrique destinée spécifiquement à la recherche de glochidies. Elles ont été effectuées les 17-18 avril 2019 lorsque les glochidies sont les plus grosses, juste avant que les jeunes mulettes se décrochent des poissons-hôtes. Ces pêches ont été effectuées sur 5 localités.

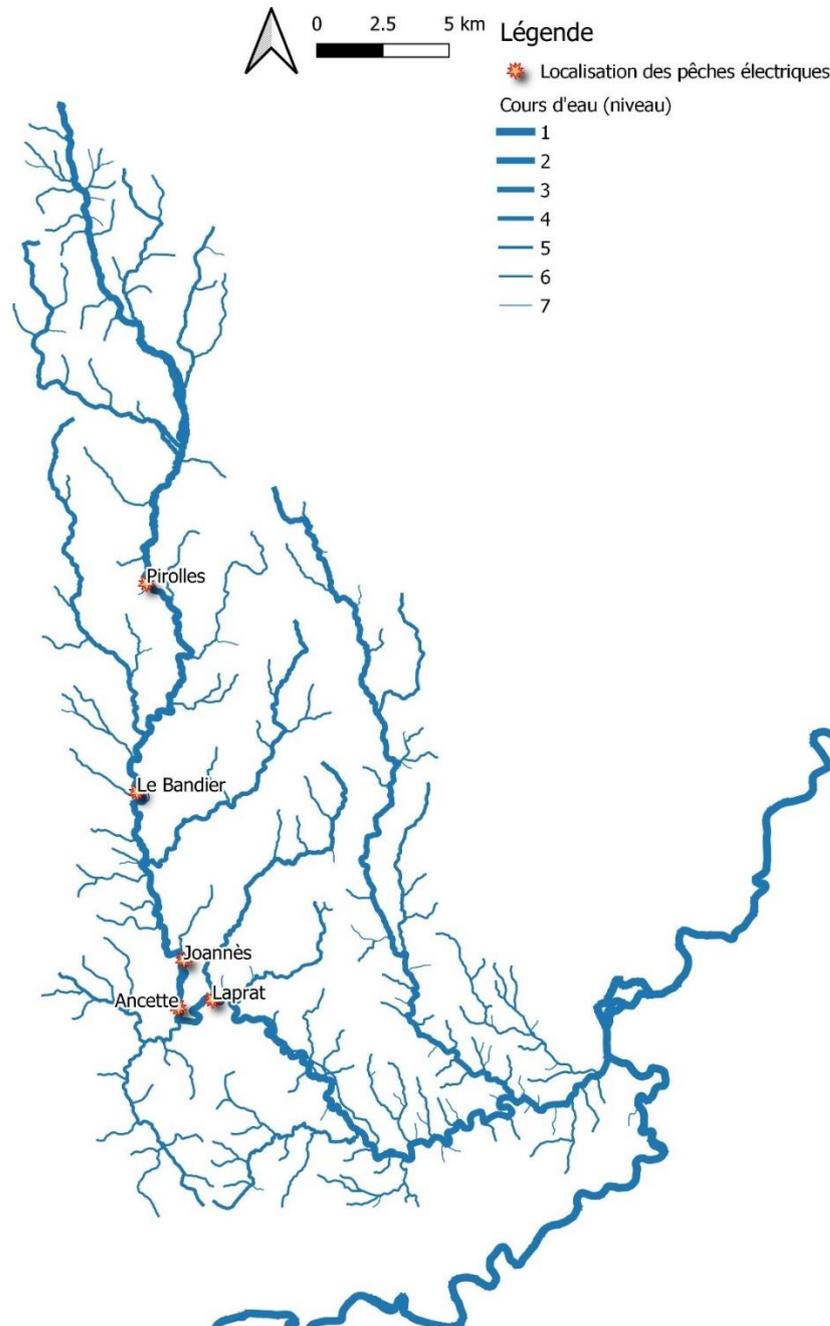


Figure 32 : Localisation des pêches électriques destinées à la recherche de glochidies

L'analyse des données repose sur le nombre moyen de glochidies par truite, le pourcentage de poissons infectés, la distance la plus proche des mulettes connues (suivant VRIGNAUD 2018), la densité estimée de mulette sur la localité la plus proche.

3.2. Résultats

Les analyses factorielles portant sur la densité des effectifs et sur la masse n'ont pas permis d'identifier des différences significatives entre les différentes situations (avec mulette perlière, sans mulette perlière ou situation inconnue) (test de Monte Carlo, $p > 0,05$; Figure 33 à Figure 36).

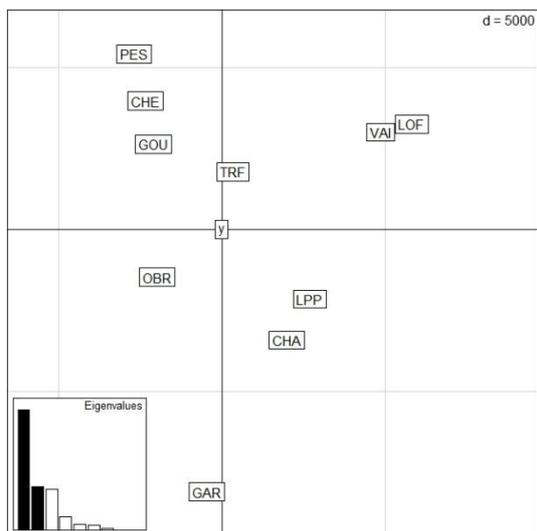


Figure 33 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de poissons – contribution des espèces*

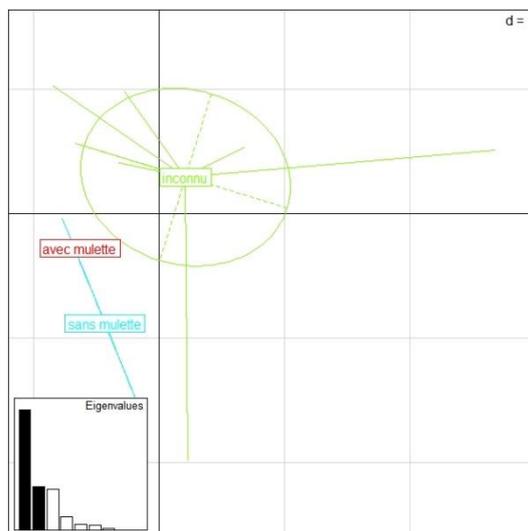


Figure 34 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de poissons – ellipses des peuplements suivant la situation vis-à-vis de la mulette perlière

* La signification des abréviations des poissons figure en annexe 4

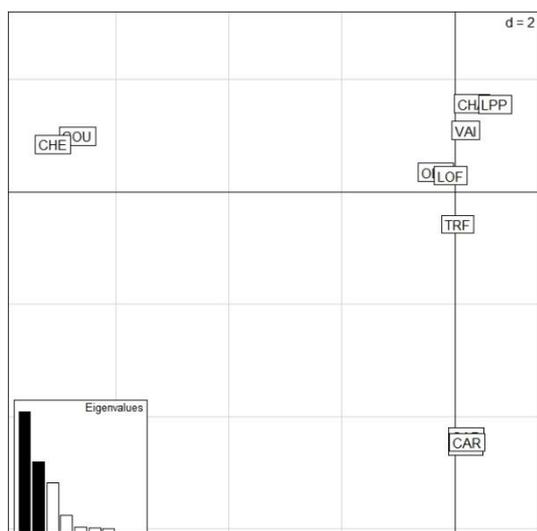


Figure 35 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de masses – contribution des espèces*

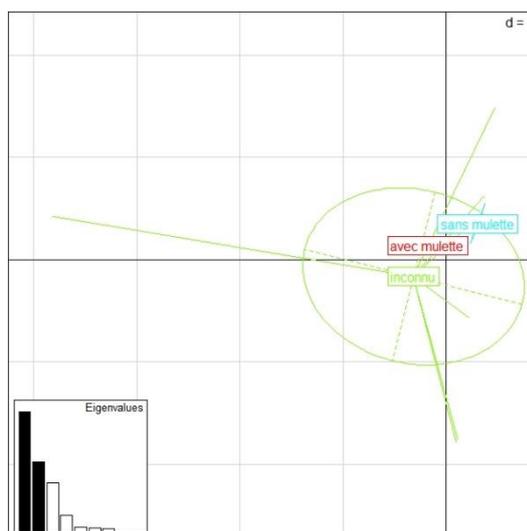


Figure 36 : Analyse factorielle de correspondance du peuplement piscicole en densité de masses – ellipses des peuplements suivant la situation vis-à-vis de la mulette perlière

* La signification des abréviations des poissons figure en annexe 4

Concernant l'infection des truites, il est à noter que des truites infectées ont été trouvées jusqu'à une distance de 2 654 m des moulettes connues les plus proches. En outre, malgré la présence d'une population très importante et d'une densité tout autant élevée, les truites pêchées dans le canal de l'Ancette ne comptent que 4,62 % de poissons infectés (moyenne à 11,23 %) et en moyenne que 0,046 glochidies par poisson pêché (moyenne à 0,15).

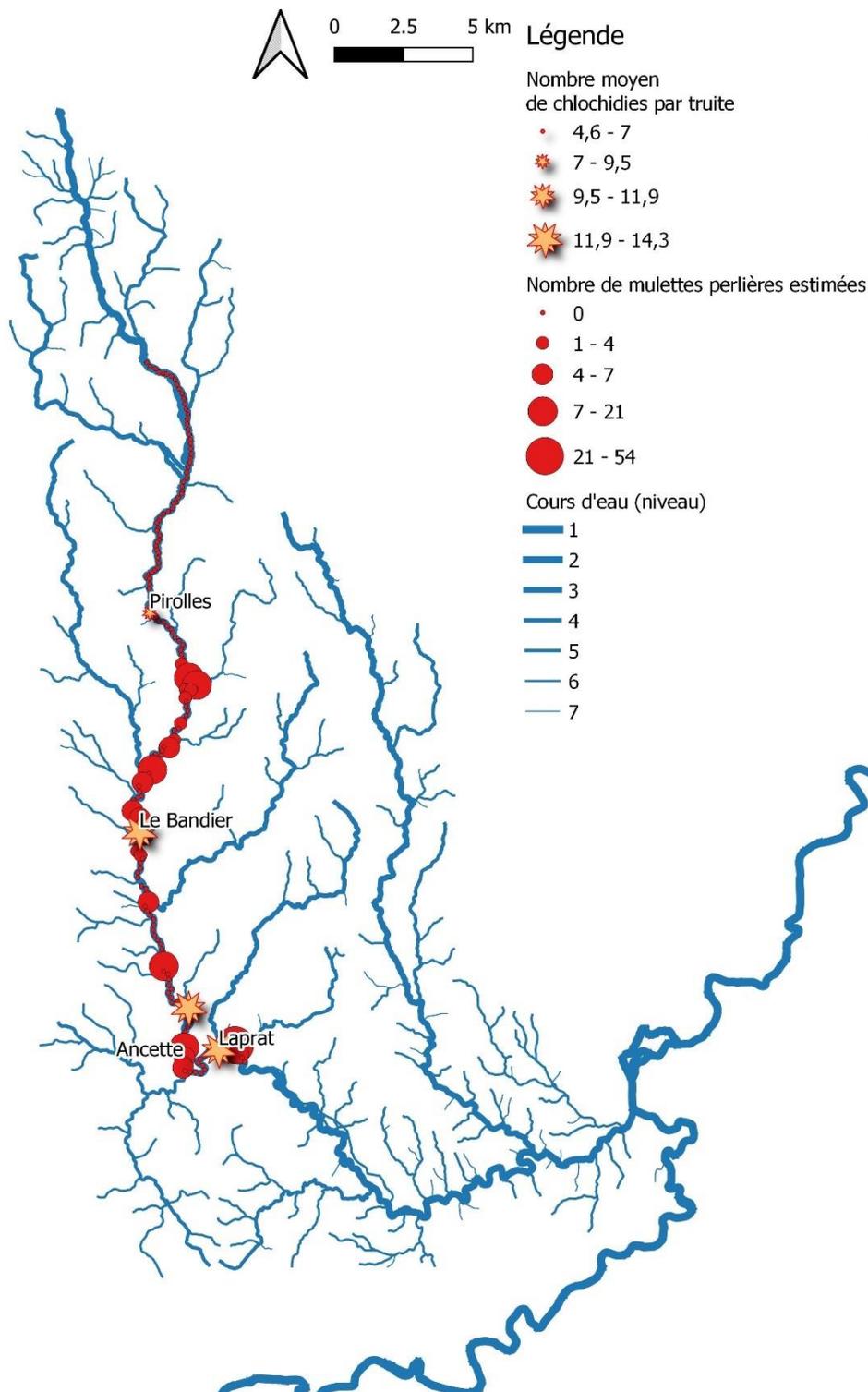


Figure 37 : Nombre moyen de glochidies par truite (Athos Environnement 2019) et nombre de moulettes perlières estimées (selon VRIGNAUD, 2018)

Tableau 12 : Caractéristique des stations de pêche électriques destinées à la recherche de glochidies (suivant Athos Environnement, 2019)

Site	Pourcentage de poissons infectés	Nombre moyen de glochidies par poisson pêché	Distance la plus proche du tronçon où la moulette perlière est connue (suivant VRIGNAUD 2018)	Densités estimés de mulettes perlières sur le tronçon où elle présente et le plus proche (suivant VRIGNAUD 2018)
Joannes	14,29	0,196	780	0,005
Laprat	14,29	0,179	700	0,150
Pirolles	8,09	0,089	2 654	0,005
Bandier	14,00	0,240	180	0,005
Ancette	4,62	0,046	543	2,628
Moyenne	11,24	0,150	971	0,559
Minimum	4,62	0,046	180	0,005
Maximum	14,29	0,240	2 654	2,628

3.3. Discussion

L'analyse du peuplement piscicole et de l'infection des truitelles repose sur peu d'échantillons (respectivement 10 et 5). Une analyse statistique robuste n'est pas possible. Cependant, des enseignements intéressants peuvent émerger.

Ainsi, il ne semble pas qu'il y ait de différences significatives entre les différents peuplements piscicoles (effectifs et biomasse) du bassin versant de l'Ance. Ce facteur ne semble donc pas expliquer la régression de la naïade étudiée.

De même, les truites infectées sur le site de Pirolles se situent à près de 2,7 km des individus de mulettes actuellement connus. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette situation : soit des mulettes n'ont pas été détectées ; cette hypothèse est très probable non seulement du fait d'une détection imparfaite (67±5 %), soit cette situation résulte d'une prospection volontairement incomplète avec un tronçon de 20 m décrit tous les 200 m (VRIGNAUD, 2018). La technique de la recherche de glochidies à l'aide de la pêche électrique a été reconnue par certains auteurs comme une solution intéressante pour la recherche de mulettes perlières adultes (SALONEN & TASKINEN, 2017). Cet élément vient renforcer l'hypothèse selon laquelle des individus seraient présents à proximité sans qu'il n'ait été vus.

La faible proportion de truites infectées (4,62 %) et la faible pression de parasitage (0,046 glochidie en moyenne par truite) dans le canal de l'Ancette est assez surprenante au regard des densités de mulettes situées à proximité. Cette situation pourrait s'expliquer par une propension des truites à remonter le courant à un certain stade. Un enseignement particulièrement intéressant de la présence de truites infectées sur la partie aval du canal de l'Ancette se dégage. Cette détection de truitelles infectées prouve la colonisation par des jeunes mulettes. Toutefois, la seule pêche électrique sur la partie aval du canal de l'Ancette a été effectuée en 2017. La dynamique de dissémination sur ce secteur est inconnue en l'absence de recul temporel (qu'en était-il auparavant ? Est-ce qu'il y a toujours eu des truitelles infectées dans ce secteur du bief ?). A ce jour, aucune jeune moulette n'a été trouvée sur le bief, mais il présente un réel potentiel conforté par la présence de truites infectées juste avant que les jeunes moules se désenkystent. Des prospections devraient avoir régulièrement lieu sur ce bief dans la partie aval afin de confirmer ou non la recolonisation de ce secteur.

4. Indice hydrobiologique et Indice diatomée

4.1. Méthodologie

4.1.1. Localisation des points d'échantillonnage et date d'échantillonnage

La localisation des points d'échantillonnage dans le cadre du contrat de rivière est la même que celle des variables physico-chimiques et des pêches électriques : 10 points (CT1 à CT10) dont un avec des mulettes perlières juste à proximité CT3 (Figure 31).

Deux campagnes d'échantillonnage ont eu lieu : en 2014-2015 et 2019-2020. Les prélèvements ont été effectués le 18/06/2014, les 01 et 02/07/2015, les 24-25 et 26/07/2019 et les 17, 27-28/08/2020.

4.1.2. Indices diatomiques

En plus du peuplement de diatomées issues des effectifs suivant les espèces en un lieu et une date donnée, des indices ont été pris en compte. Ces indicateurs reposent sur la connaissance de l'écologie de chacune des espèces, de leur identification et de leur abondance

En effet, l'indice biologique diatomée (IBD) est un indice (de 1 à 20) de qualité générale de l'eau basé en particulier sur les matières oxydables et la salinité qui ne prend pas en compte tous les taxons d'un relevé. Le comptage de 400 individus, n'identifie que les groupes d'espèces (taxons) intervenant dans le calcul de l'indice. Une note de 1 correspond à une eau de très mauvaise qualité à l'inverse d'une note de 20 qui correspond à la note idéale.

L'IPS (Indice de Polluosensibilité Spécifique) est un indice fondé sur la pondération "abondance-sensibilité spécifique". Il présente l'avantage de prendre en compte la totalité des espèces présentes dans les inventaires. Il permet de donner une note à la qualité de l'eau variant de 1 (eaux très polluées) à 20 (eaux pures).

4.1.3. Analyse statistique

L'analyse du peuplement des diatomées repose sur les années 2019 et 2020. Elle a été faite par un dendrogramme via une Analyse de Facteurs de Correspondance (AFC) et la méthode Ward. Une étape intermédiaire a consisté à rechercher les sauts d'inertie afin de définir le nombre de classes retenues au sein du dendrogramme.

L'analyse des indices de macro-invertébrés repose en premier temps par une analyse de correspondance principale avec les différentes composantes de l'indice I2M2 permettant ainsi d'apprécier la similitude des stations par un dendrogramme suivant la même méthode que pour les diatomées. Une approche des variations de l'I2M2 a ensuite été réalisée. Toutes ces données reposent sur les années 2019 et 2020.

4.2. Résultats

Le peuplement de diatomées est variable d'une année sur l'autre et dans l'espace (Figure 38 à Figure 43). L'analyse de l'AFC fait ressortir une très grande disparité entre les points au regard du peuplement de diatomées (Figure 38 et Figure 41). De mêmes les classifications hiérarchiques (dendrogrammes) sont variables suivant les années (Figure 39 et Figure 42).

De ces dendrogrammes, il ressort une affinité entre la station CT03 (celle avec de la moulette perlière) et la CT04 (en 2019) (Figure 39) et la station CT01 (en 2020) (Figure 42). Géographiquement, dans le premier cas (2019), il s'agit du point le plus en aval du bassin versant (en aval du barrage de Passouira (Figure 40)). Dans le second cas, il s'agit du point le plus en amont (Figure 43).

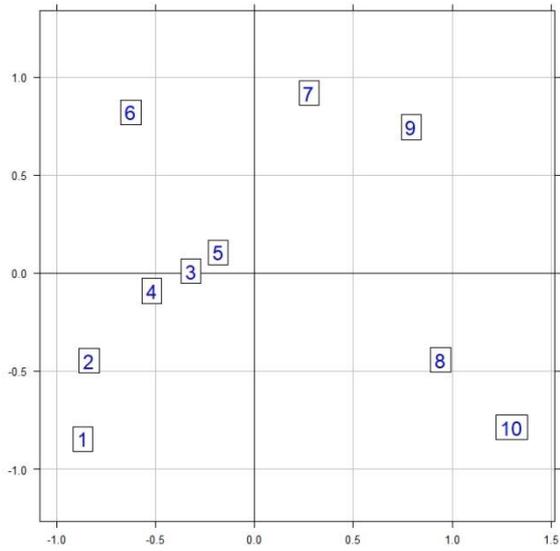


Figure 38 : Positionnement des points d'échantillonnage suivant l'AFC du peuplement de diatomées en 2019

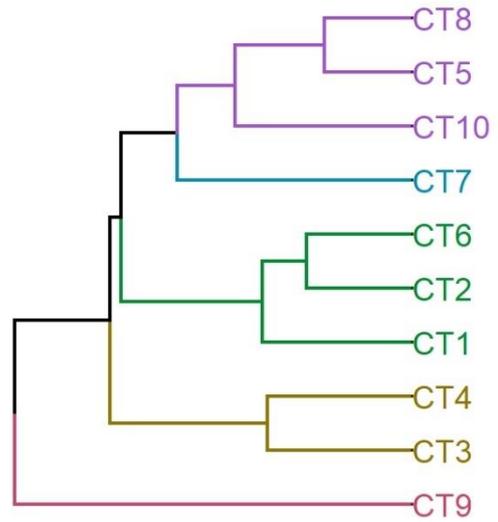


Figure 39 : Dendrogramme des stations de prélèvements suivant leur peuplement de diatomées en 2019

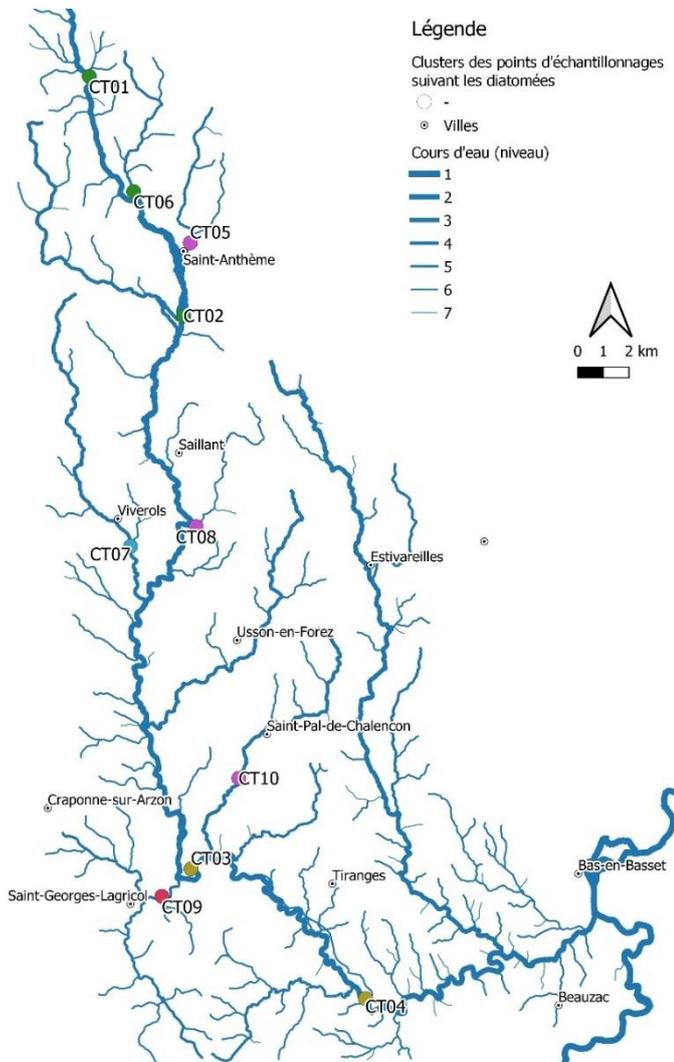


Figure 40 : Classement des points de prélèvement suivant le peuplement de diatomées et le dendrogramme pour l'année 2019

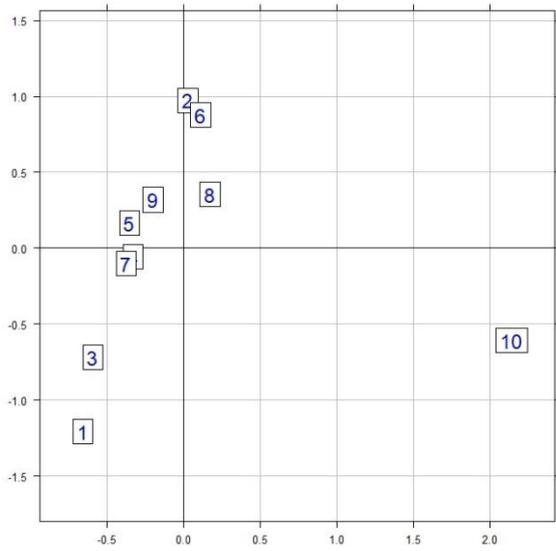


Figure 41 : Positionnement des points d'échantillonnage suivant l'AFC du peuplement de diatomées en 2020

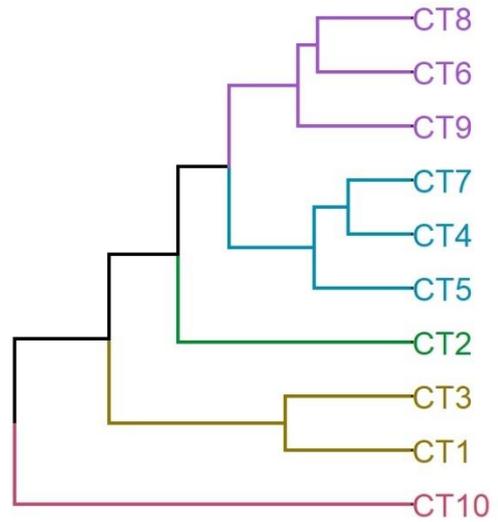


Figure 42 : Dendrogramme des stations de prélèvements suivant leur peuplement de diatomées en 2020

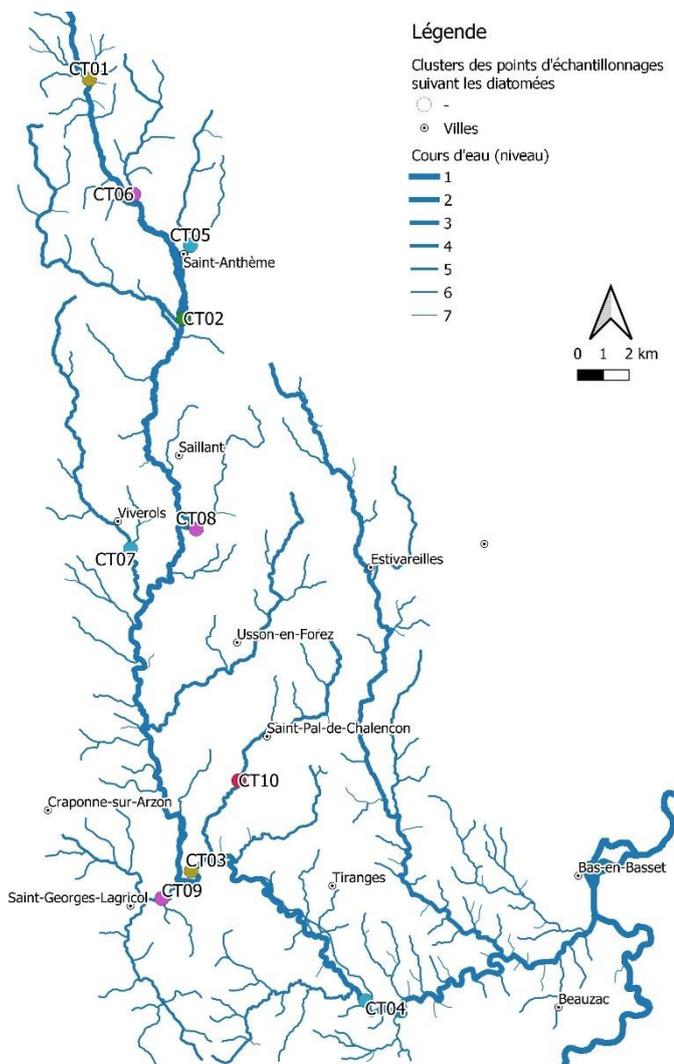


Figure 43 : Classement des points de prélèvement suivant le peuplement de diatomées et le dendrogramme pour l'année 2020

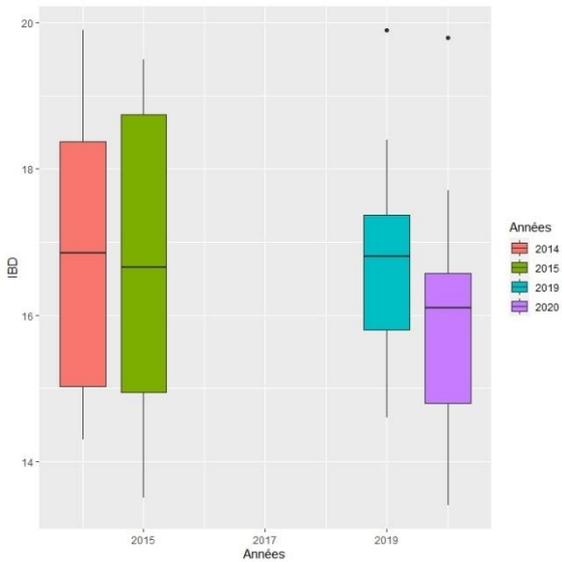


Figure 44 : Variation de l'ensemble des indices biologiques diatomées (IBD) au fil des ans

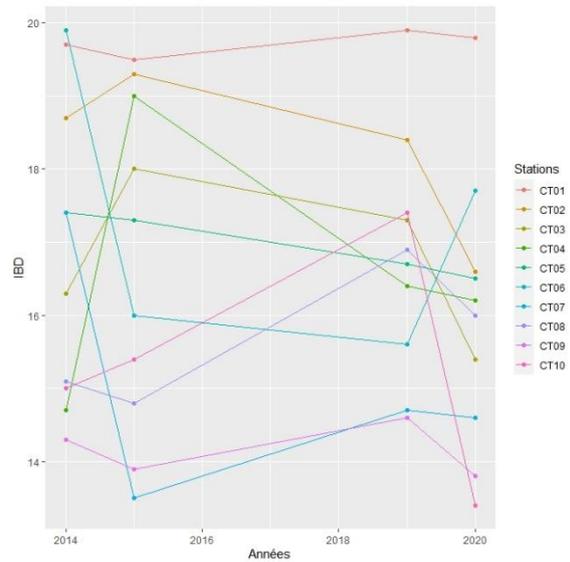


Figure 45 : Variation de chacun des indices biologiques diatomées (IBD) des stations

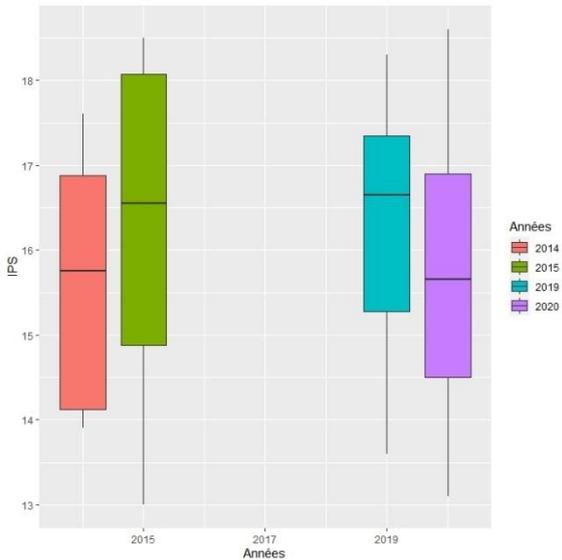


Figure 46 : Variation de l'ensemble des Indice de polluosensibilité Spécifique (IPS) au fil des ans

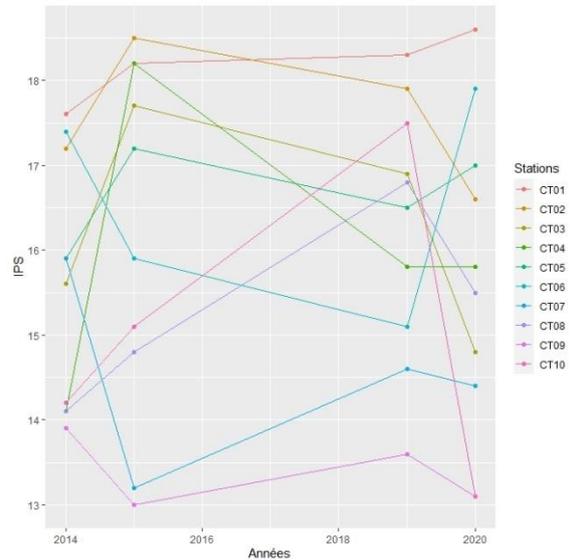


Figure 47 : Variation de chacun des Indice de polluosensibilité Spécifique (IPS) des stations

Il a certes été constaté des variations interannuelles le temps du suivi pour l'IBD et l'IPS. Toutefois, il n'y a pas de tendances nettes qui se dessinent tant globalement que site par site (Figure 44 à Figure 47). Les stations CT01 et CT02 figurent parmi les stations les mieux classées au regard des critères de l'IBD et de l'IPS. Il est à préciser que le point de prélèvement CT01 se situe en tête de bassin versant. Quant au point CT02, il reste dans le quart amont de la zone d'étude (sur l'Ance du nord).

L'analyse de l'I2M2 et de ces composantes sur les années 2019 et 2020, indique des disparités entre les sites reposant principalement sur l'I2M2 et le polyvoltinisme (avec plusieurs périodes d'émergence) de 2020 (contribuant respectivement à hauteur de 87,64 % et 73,30 %) (Tableau 13). Le dendrogramme en découlant fait ressortir la station CT3, celle avec la présence de moulette perlière, à part (Figure 50). Les stations les plus similaires CT3 et CT10 sont globalement trop différentes au regard de ce critère pour être considérées comme similaires.

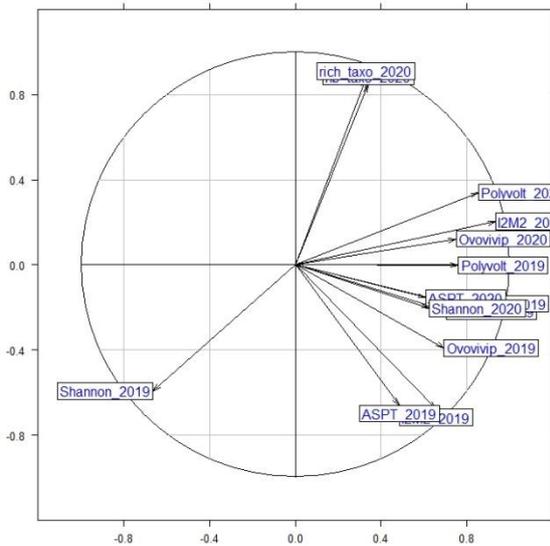


Figure 48 : Contribution des variables à l'analyse de composantes principales (ACP) de l'I2M2 et ses composantes pour 2019 et 2020

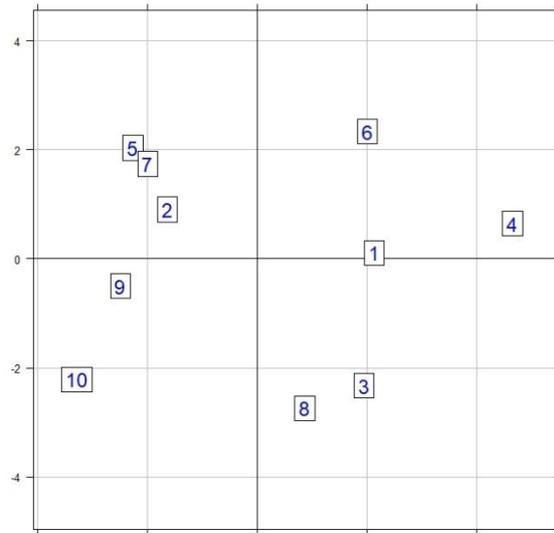


Figure 49 : Positionnement des points d'échantillonnage suivant l'ACP de l'I2M2 et ses composantes pour 2019 et 2020

Tableau 13 : Contribution des variables sur l'axe 1 de l'ACP

Variables	Années	Abréviations	Contribution (axe 1) (en %)
I2M2 - Indice Invertébré Multimétrique	2020	I2M2_2020	87,64
Métrique Polyvoltinisme de l'I2M2	2020	Polyvolt_2020	73,30
Métrique Polyvoltinisme de l'I2M2	2019	Polyvolt_2019	57,94
Métrique Ovoviviparite de l'I2M2	2020	Ovovivip_2020	56,50
Métrique Richesse Taxonomique de l'I2M2	2019	rich_taxo_2019	52,87
Nombre de taxons contributifs de l'I2M2	2019	nb_taxo_2019	49,50
Métrique Ovoviviparite de l'I2M2	2019	Ovovivip_2019	48,19
Métrique Indice de Shannon de l'I2M2	2019	Shannon_2019	44,13
I2M2 - Indice Invertébré Multimétrique	2019	I2M2_2019	43,11
Métrique Indice de Shannon de l'I2M2	2020	Shannon_2020	39,17
Métrique ASPT de l'I2M2	2020	ASPT_2020	37,32
Métrique ASPT de l'I2M2	2019	ASPT_2019	23,59
Nombre de taxons contributifs de l'I2M2	2020	nb_taxo_2020	11,59
Métrique Richesse Taxonomique de l'I2M2	2020	rich_taxo_2020	10,85

La valeur de l'I2M2 pour l'ensemble des sites progresse entre 2019 et 2020 (glm ; $p = 0,045$) (Figure 51). A l'exception des stations CT08 et CT10, la qualité des cours d'eau s'améliore au regard de ce critère (Figure 52).

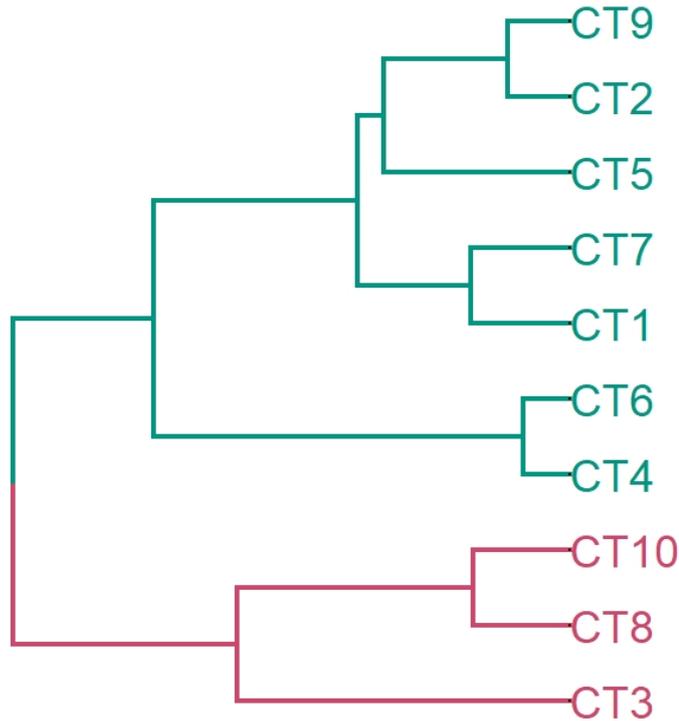


Figure 50 : Dendrogramme des stations de prélèvements suivant l'I2M2 et ses composantes pour les années 2019 et 2020

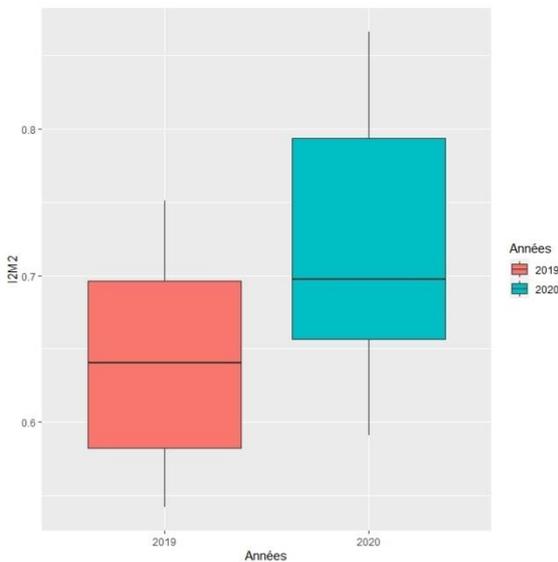


Figure 51 : Variation de l'I2M2 entre 2019 et 2020

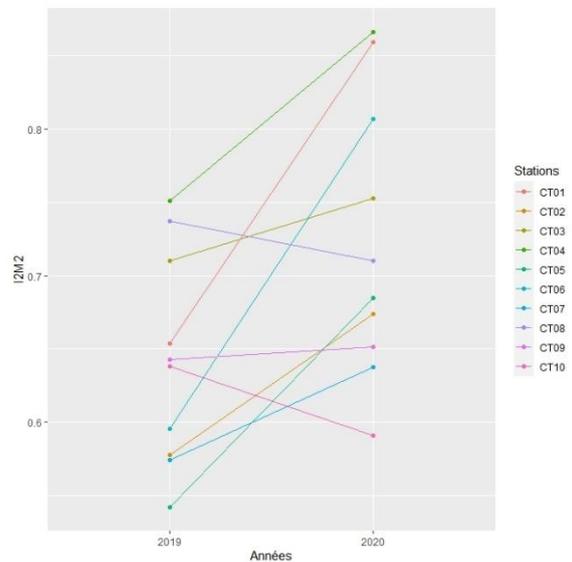


Figure 52 : Variation de l'I2M2 entre 2019 et 2020 suivant les stations

4.3. Discussion

L'étude des diatomées, comme avec les autres indices biotiques, permet d'avoir une vision sur un pas de temps plus long que des analyses physico-chimiques. Cette complémentarité est intéressante pour une mise en perspective des résultats et comme indicateur de résultat.

Toutefois, la variabilité de ce type d'indicateur complique l'interprétation à cette échelle tant de temps que d'espace. Dégager des conclusions au regard de la moulette perlière semble délicat.

On notera que globalement, la qualité de l'eau suivant cet indicateur est bonne à très bonne et en particulier et fort logiquement en tête de bassin versant. Il n'a pas été constaté de changement net durant la période de l'étude suivant ces mêmes indicateurs. Il n'y a donc pas eu de nette amélioration et à l'inverse de forte dégradation de la qualité de l'eau.

L'indicateur I2M2 n'apporte guère d'éléments de compréhension et de mise en perspective de la moulette perlière suivant ce critère. Certes, la qualité du milieu est intéressante, mais il n'y a pas de station similaire à celle où la moulette perlière est présente. En outre, la variation progressive de l'I2M2 est intéressante. Toutefois, elle est probablement plus le fruit de conjonctures hydrosédimentaires et hydriques selon les variations météorologiques d'une année sur l'autre que d'une progression structurelle. L'absence de mise en perspective dans le temps empêche une interprétation plus développée.

En outre, l'assemblage des peuplements diatomiques ou macrobenthiques répond aux mêmes règles de « niche écologique » que la Mulette, et c'est justement la composition de ces assemblages qu'il est intéressant d'analyser lorsqu'on fait un I2M2 ou un IBD. Or, les indices biologiques sont trop « globalisant » et je pense que des informations beaucoup plus pertinentes sont à rechercher sur des métriques écologiques plus en lien avec les traits écologiques des peuplements. Une perspective de travail intéressante consisterait à étudier ces variables à une échelle plus large au même titre que la physico-chimie.

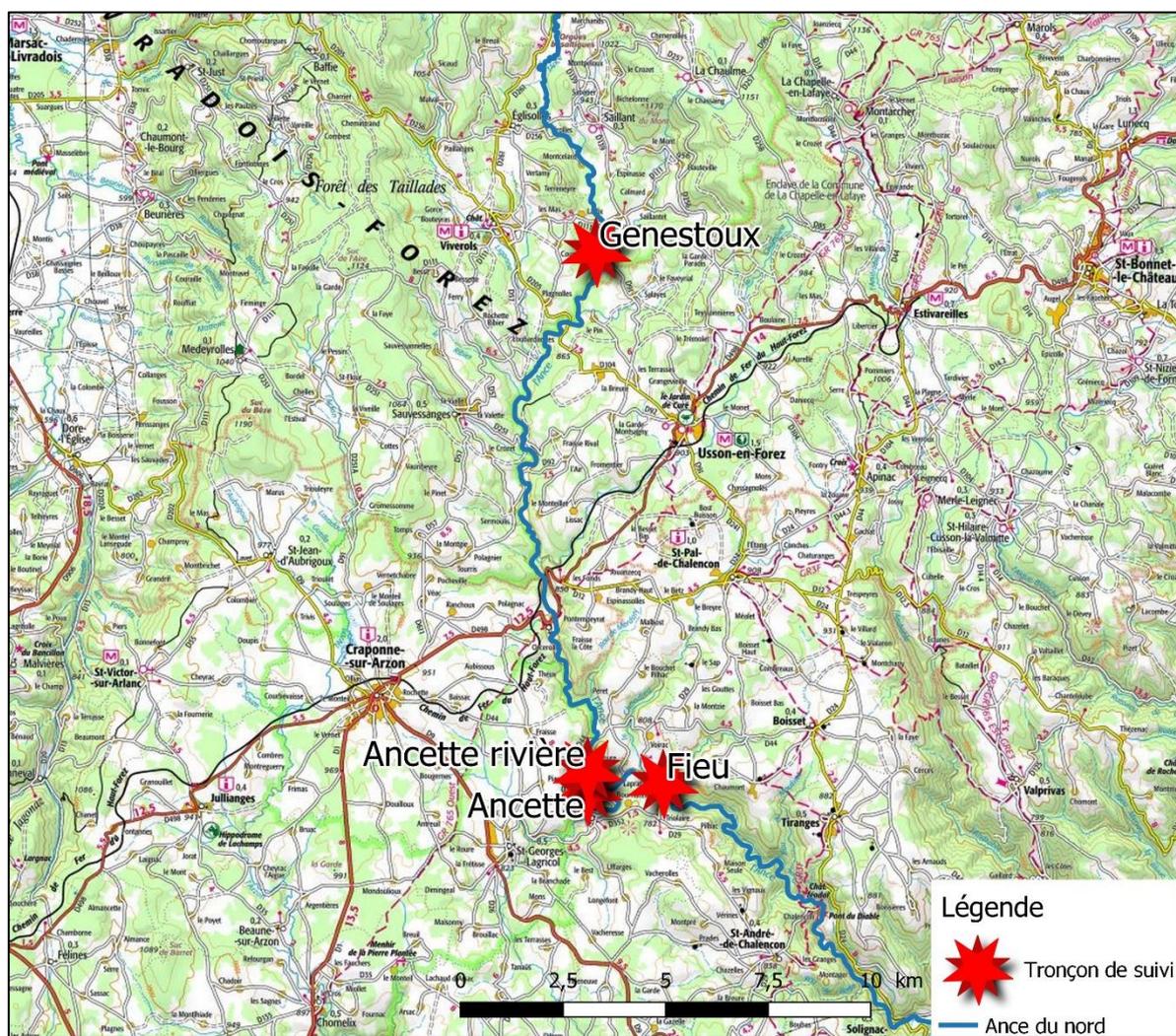
Enfin, une des limites de l'exercice réside dans une comparaison globale de toutes les stations, c'est de ne pas prendre en compte les spécificités de ces stations. Certaines, je pense au Chandieu (CT10), ont été positionnées spécifiquement pour évaluer l'impact d'un rejet dont on savait par avance qu'il était potentiellement mal géré. Enfin, au-delà du niveau ou du type de pressions, la biotypologie est très différente entre CT01 et CT04 (pente, largeur, hydrologie, altitudes, niveau naturel de trophie et fonctionnement trophique, etc.). Ainsi, une même note I2M2 ou IBD en CT01 et CT04 ne s'interprète pas selon les mêmes grilles de lecture.

5. Suivi de tronçons

Dans le cadre du contrat de rivière de l'Ance du nord, 4 tronçons de rivière ont bénéficié d'un suivi. L'un se trouvait dans le bief du moulin de l'Ancette et est un secteur à très forte densité. Trois autres (Genestoux, Ancette et le Fieu) sont des tronçons de 50 mètres de long. Ces derniers tronçons bénéficient en plus d'un suivi de différentes variables environnementales afin d'apprécier l'évolution du milieu, de mieux cerner les exigences de l'espèce et d'observer une éventuelle amélioration de l'habitat.

Le suivi du nombre d'individus a permis de déceler une régression certaines sur 2 de ces tronçons : les Genestoux et le Fieu avec respectivement des dates de disparition évaluées à 2026-2028 et 2027-2031 (VRIGNAUD, 2021).

Dans ce contexte, il paraissait intéressant d'effectuer un parallèle entre les données environnementales et les tendances observées des effectifs sur les tronçons concernés.



5.1. Méthodologie

5.1.1. Perméabilité sédimentaire

La perméabilité sédimentaire a été prise en compte à travers le redox qui indique soit l'oxydation (passage de l'oxygène dans les sédiments et donc d'un courant d'eau diffus), soit la réduction (absence de courant diffus dans les sédiments). L'oxydation permet donc aux différents organismes anaérobies se développant dans les sédiments, tels que la moulette perlière, de pouvoir survivre. A l'inverse, en cas de réduction, seuls les organismes anaérobies peuvent survivre. Si la valeur du redox diminue, on tend alors vers la réduction.

Le redox est un indicateur dont l'effet sur le stade juvénile de la moulette perlière a été mis en exergue par Geist et Auerswald (2007). Si la mesure dans les sédiments donne une valeur inférieure à 20% de celle dans l'écoulement de surface, on considère alors qu'il y a une moins bonne oxygénation du substrat et donc colmatage (Geist & Auerswald 2007). Le substrat est considéré comme anoxique pour des valeurs de potentiel redox inférieures à 300 mV. Ces auteurs avaient défini des valeurs moyennes (Tableau 14) pour des populations fonctionnelles et non fonctionnelles illustrées par la Figure 53.

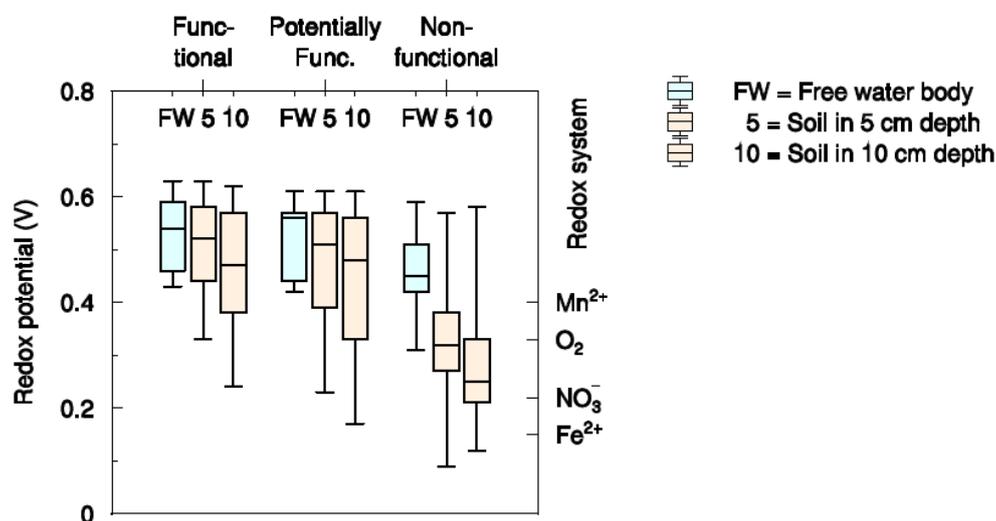


Figure 53. Potentiel redox et fonctionnalité des cours d'eau pour la Moule perlière (d'après Geist & Auerswald 2007)

Tableau 14. Valeur moyenne du potentiel redox (en V) pour des populations fonctionnelles et non fonctionnelles (d'après Geist & Auerswald 2007)

Population	Fonctionnelle	Non fonctionnelle
Colonne d'eau	0,53	0,47
Profondeur de 5 cm	0,51	0,33
Profondeur de 10 cm	0,47	0,27

Le redox a été relevé à une profondeur de 5 cm et 10 cm à l'aide de d'une sonde Electrode Redox BlueLine 32 Rx (2017 à 2020) puis d'une sonde Redox Paleo Terra (relevé 2021).

5.1.2. Granulométrie

La granulométrie a été mesurée en échantillonnant les 10 premiers centimètres du substrat, prélevés à l'aide d'une pelle à sédiment et d'un seau, face au courant, pour limiter la perte de la granulométrie la plus fine. Le prélèvement a ensuite été séché, pesé, puis tamisé dans différents tamis

respectivement de maille 5 mm, 1 mm et 0,5 mm. Le refus de chaque tamis a été pesé, permettant d'obtenir le pourcentage de chaque fraction sur le point de prélèvement.

L'intérêt de mesurer la granulométrie repose sur le fait que le colmatage peut se faire par l'apport de sédiments fins et/ou par le développement d'un biofilm à la surface des sédiments (à la faveur d'une charge nutritionnelle importante dans l'eau).

5.1.3. Physico-chimiques de l'eau

Enfin, des échantillons d'eau ont été analysés afin de relever différentes variables reflétant la qualité de l'eau (Tableau 15.)

Tableau 15 : Liste des variables physico-chimiques relevés dans le cadre des analyses d'eau

Nom complet	Abréviations	Unités de mesure
Demande biologique en oxygène pendant 5 jours	DBO ₅	mgO ₂ /L
Ammonium	NH ₄ ⁺	mg/L
Nitrates	NO ₃ ⁻	mg/L
Nitrites	NO ₂ ⁻	mg/L
Phosphates	PO ₄ ³⁻	mg/L
Phosphore	P	mg/L
Calcium	Ca ²⁺	mg/L
Turbidité		NFU
pH		
Conductivité		µS/cm
Température		°C
Pourcentage d'O₂		% sat
O₂ dissous		mg/L

Pour des valeurs très faibles, les valeurs issues des relevés ont été légèrement transformées afin de pouvoir effectuer des analyses statistiques.

Tableau 16 : Transformation des valeurs basses des variables physico-chimiques

Variables	Valeur initiale	Valeur retenue	Unités
DBO ₅	<0,5	0,25	mgO ₂ /L
NH ₄ ⁺	<0,01	0,005	mg/L
NO ₃ ⁻	<0,05	0,025	mg/L
NO ₂ ⁻	<0,01	0,005	mg/L
PO ₄ ³⁻	<0,015	0,01	mg/L

5.1.4. Périodicité des analyses

Les analyses et les relevés ont été menées de 2017 à 2021 et à chaque fois en juin (pour la physico-chimie), août, septembre et novembre. A chacun des relevés, des analyses d'eau ont été effectués par le laboratoire de la Drôme (LD26).

5.1.5. Analyse statistique

Une première approche a été d'apprécier les différences entre les différents sites. Pour ce faire, trois analyses de composantes principales (ACP) ont été réalisées en agrégeant toutes les données par sites. Elles concernent le redox, la granulométrie et la physico-chimie de l'eau. La différenciation des sites a ensuite été effectuée par une ANOVA des valeurs des projections sur l'axe 1.

Puis, pour chacun des sites, les variations annuelles des catégories de variables ont été appréciées pour chacun des sites à l'aide d'ACP à nouveau.

Enfin, pour apprécier les tendances, chacune des variables a été testée à l'aide de modèles linéaires généralisés (GLM) en fonction des années et pour chacun des tronçons.

5.2. Résultats

5.2.1. Perméabilité sédimentaire

L'analyse des modèles liés à la perméabilité sédimentaire fait ressortir une diminution nette du redox de la colonne d'eau, à 5 et à 10 cm de profondeur (dans les sédiments) sur le site des Genestoux (Figure 54 à Figure 56, Tableau 21). De même, une régression des nitrites est constatée. On peut noter que le coefficient directeur est sensiblement le même entre les profondeurs de 5 et de 10 cm (respectivement de $-0,14 \pm 0,03$ et de $-0,13 \pm 0,03$). En outre, les valeurs observées correspondent à une situation de population non fonctionnelle constatée par GEIST & AUERSWALD (2007).

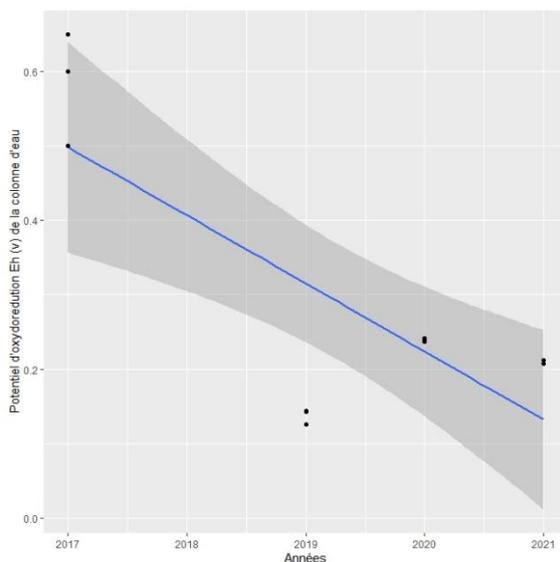


Figure 54 : Graphique de la tendance significative à la baisse du redox de la colonne d'eau aux Genestoux

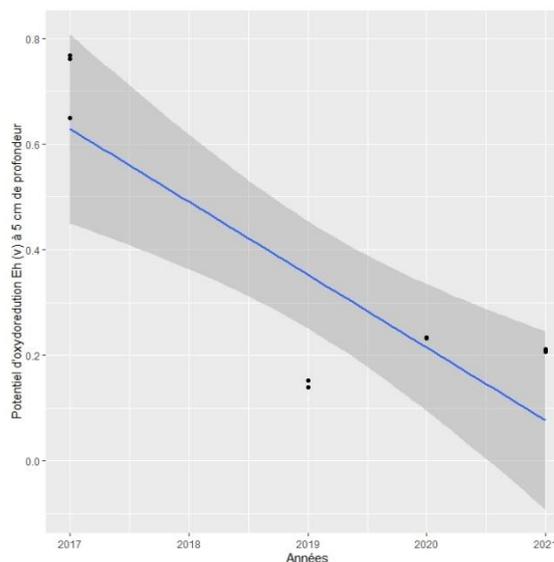


Figure 55 : Graphique de la tendance significative à la baisse du redox à 5 cm de profondeur aux Genestoux

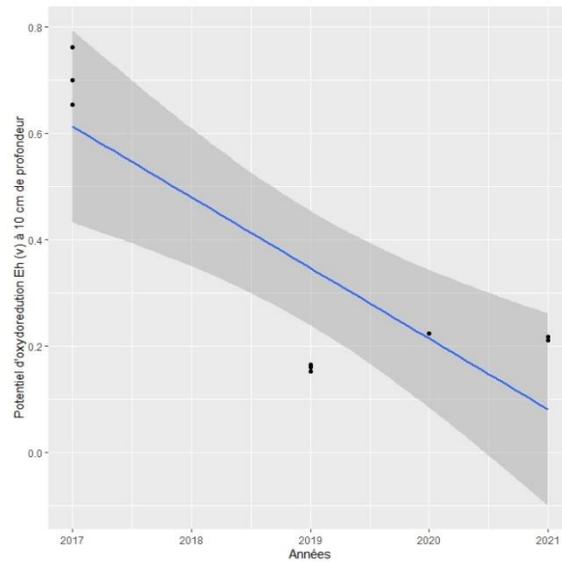


Figure 56 : Graphique de la tendance significative à la baisse du redox à 10 cm de profondeur aux Genestoux

Aucune tendance évidente n'est constatée sur les autres sites (Ancette et Fieu). Par contre, sur l'ensemble des sites, pris dans leur globalité, une diminution très évidente (p de 0,001 à 0,009) du redox est constatée tant sur la colonne d'eau qu'à des profondeurs de 5 et 10 cm (Figure 57 à Figure 59 et Tableau 22). Les coefficients directeurs sont par ailleurs très semblables (respectivement de $-0,067 \pm 0,019$; $-0,065 \pm 0,022$ et $-0,062 \pm 0,022$).

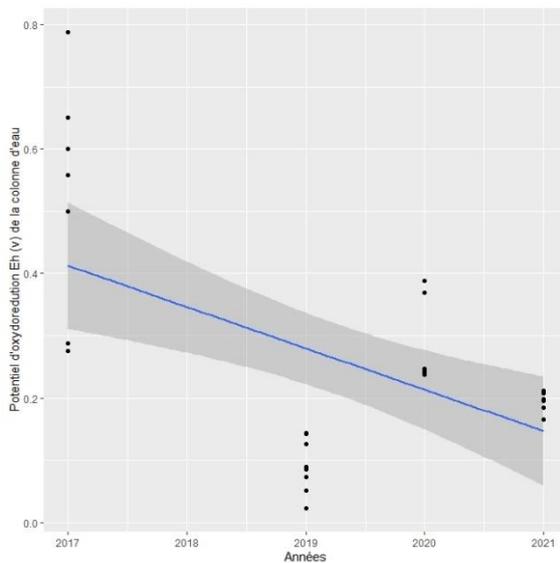


Figure 57 : Variation du redox de la colonne d'eau sur tous les sites en fonction des années

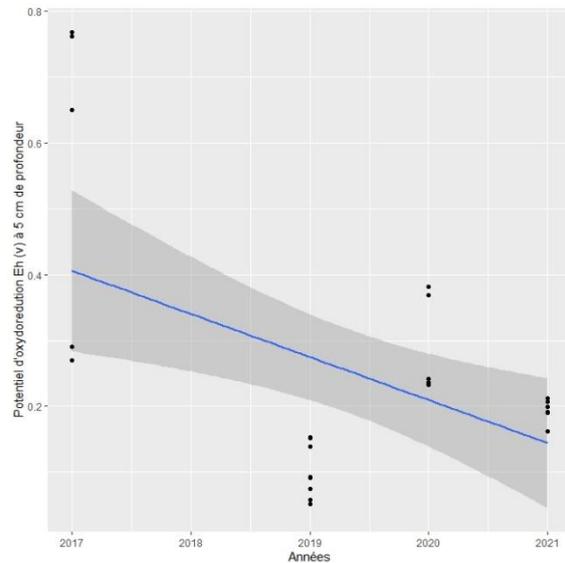


Figure 58 : Variation du redox à 5 cm de profondeur sur tous les sites en fonction des années

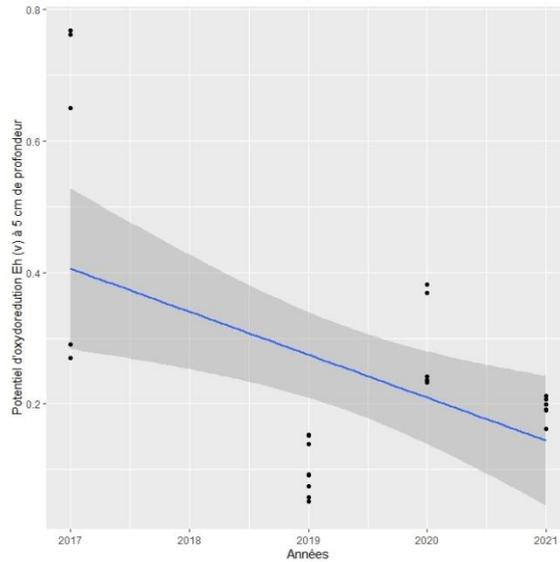


Figure 59 : Variation du redox à 10 cm de profondeur sur tous les sites en fonction des années

5.2.2. Granulométrie

L'analyse de la granulométrie par l'analyse de correspondances principale fait systématiquement ressortir une opposition de la granulométrie grossière (> 5 mm) par rapport à celles plus fine (de 1 à 5 mm et inférieure à 0,5 mm) (Figure 60, Figure 63, Figure 66 et Figure 69). Par ailleurs, les granulométries les plus fines sont plutôt corrélées.

Site par site il est constaté fort logiquement une grande variabilité de la granulométrie suivant les années (Figure 61, Figure 64, Figure 67, Figure 70) (anova ; $p = 0,047$). On remarquera que l'année 2019 figure toujours dans les valeurs les plus élevées de l'axe 1 (granulométrie supérieure à 5 mm) quel que soit le site (Figure 62, Figure 65, Figure 68, Figure 71 et Figure 72) bien que statistiquement non significativement différente des autres années (test de Tuckey, une seule catégorie pour toutes les années).

En comparant site par site (quelles que soient les années), le site du Fieu ressort comme étant modérément différent des sites de l'Ancette et des Genestoux (anova de l'axe 1 en fonction des sites ; $p = 0,051$). Cela se dessine plus précisément pour la granulométrie de 0,5 à 1 mm pour laquelle le site de l'Ancette se situe dans une position intermédiaire entre celui des Genestoux et du Fieu (Figure 73 et Tableau 17). La proportion de sédiments de plus de 5 mm révèle une différenciation modérée à faible entre l'Ancette et les deux autres sites (anova : $p = 0,077$) bien qu'aucun groupe ne puisse réellement être différencié. Pour ce diamètre de sédiment, Ancette possède une granulométrie modérément et proportionnellement moins importante.

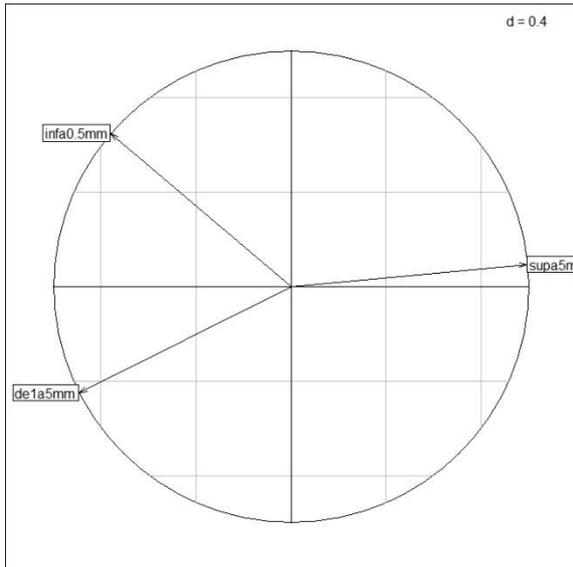


Figure 60 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie des Genestoux

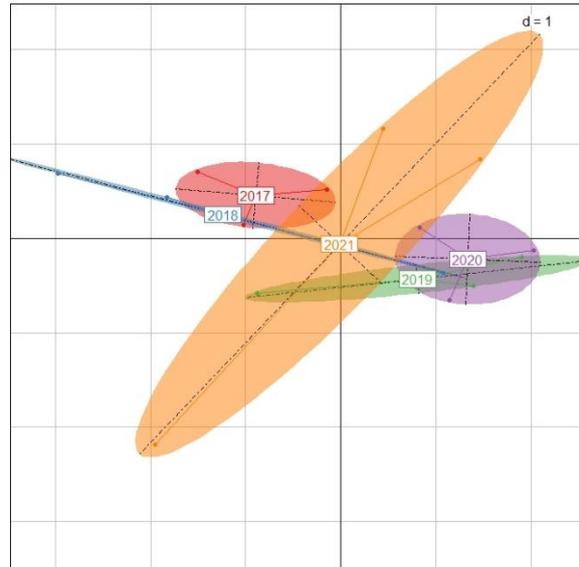


Figure 61 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP pour les Genestoux

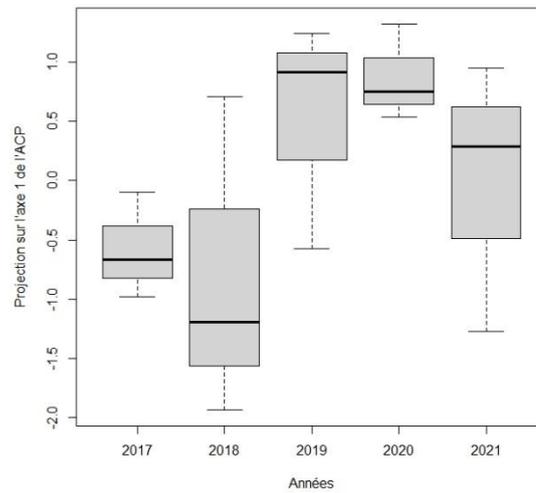


Figure 62 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour le site des Genestoux

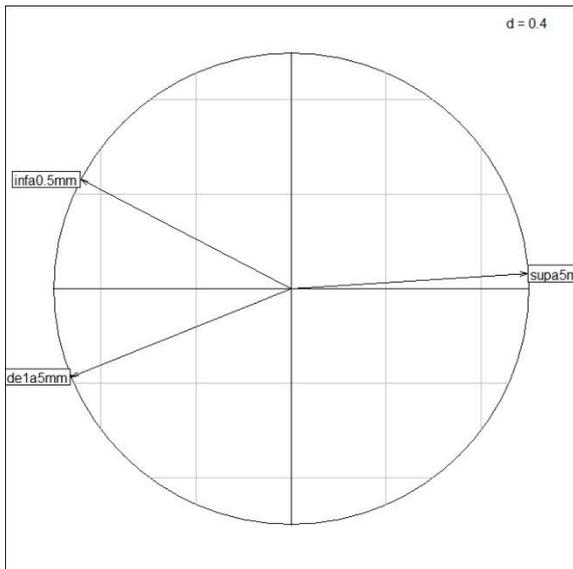


Figure 63 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie d'Ancette (rivière)

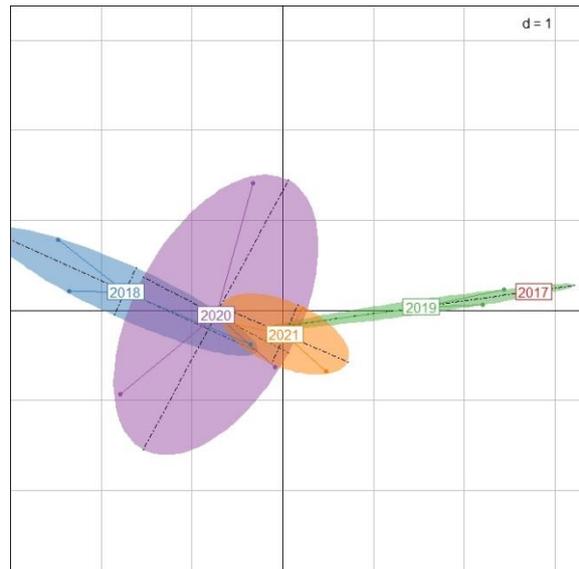


Figure 64 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP pour Ancette (rivière)

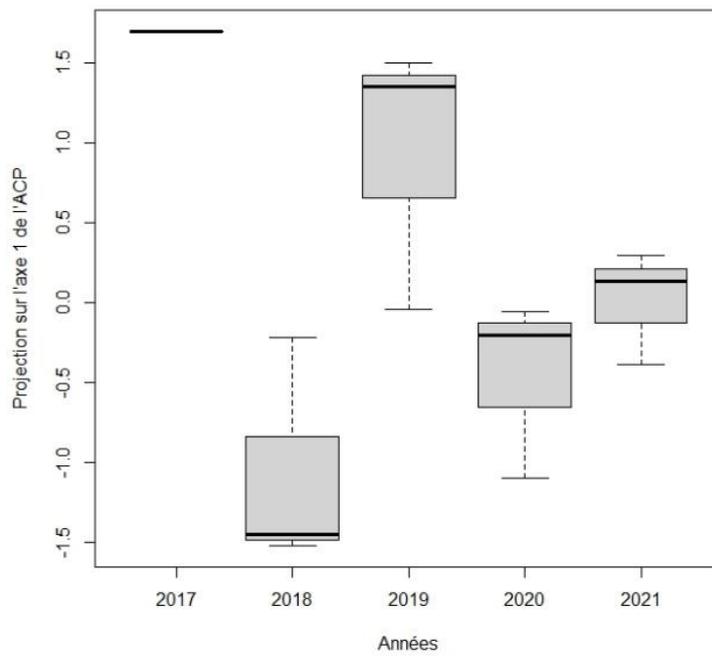


Figure 65 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour le site d'Ancette (rivière)

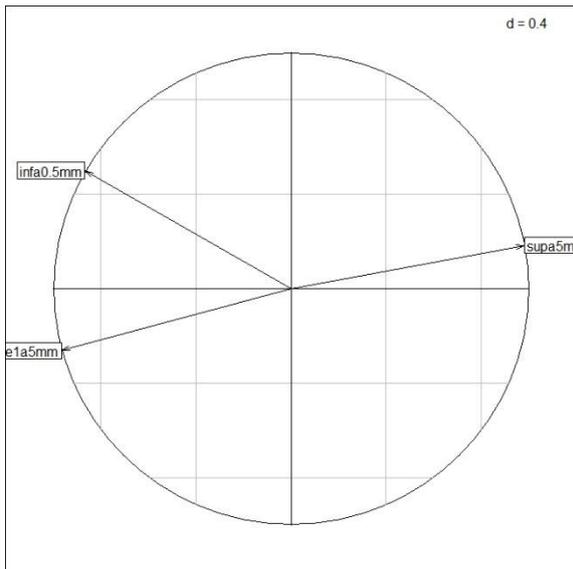


Figure 66 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie du Feu

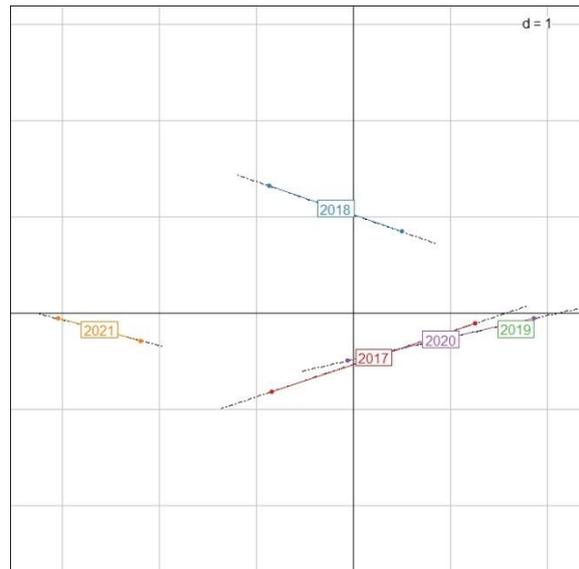


Figure 67 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP pour le Feu

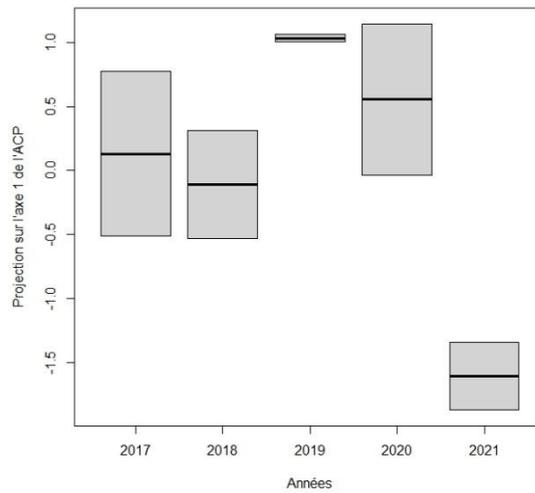


Figure 68 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour le site du Feu

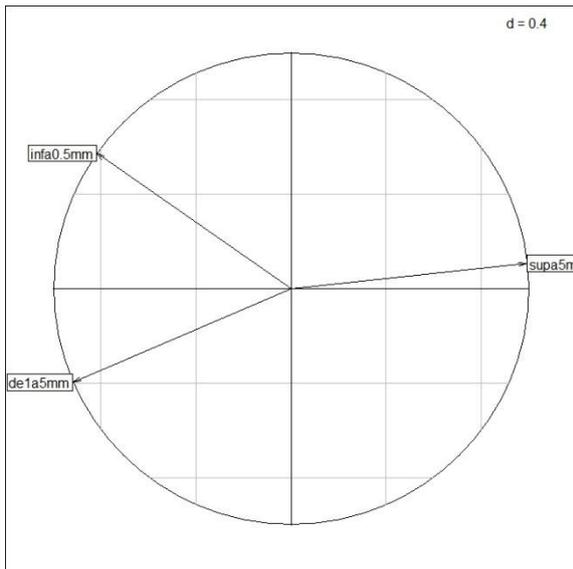


Figure 69 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la granulométrie suivant les sites

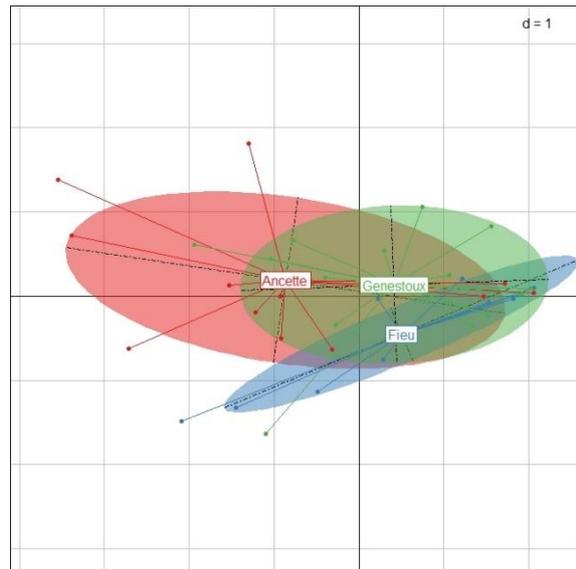


Figure 70 : Ellipses de la granulométrie suivant les années par l'ACP suivant les sites

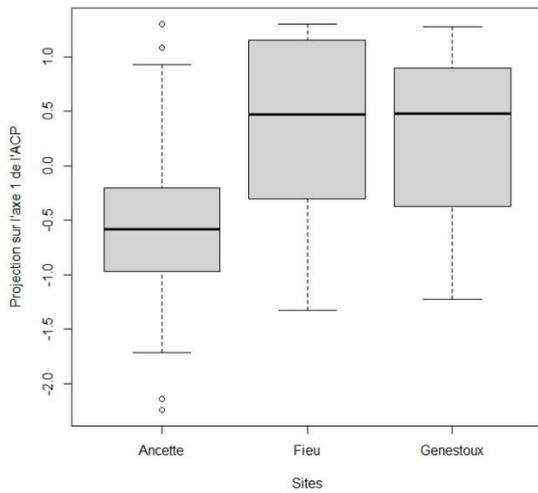


Figure 71 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP granulométrie suivant les sites

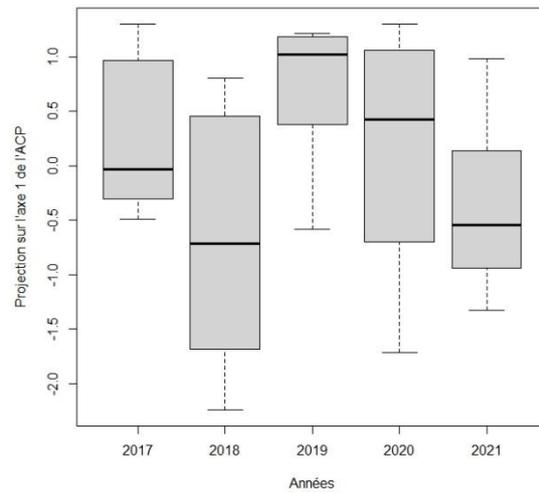


Figure 72 : Boîtes à moustaches des projections des années sur l'axe 1 de l'ACP pour l'ensemble des sites suivant les années

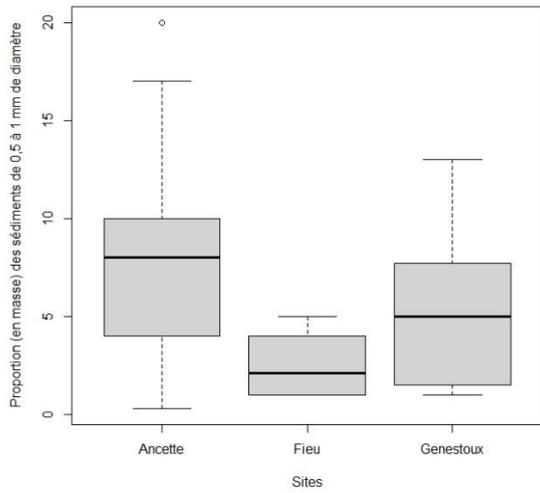


Figure 73 : Boîtes à moustaches de la proportion de sédiments de 0,5 à 1 mm de diamètre suivant les sites

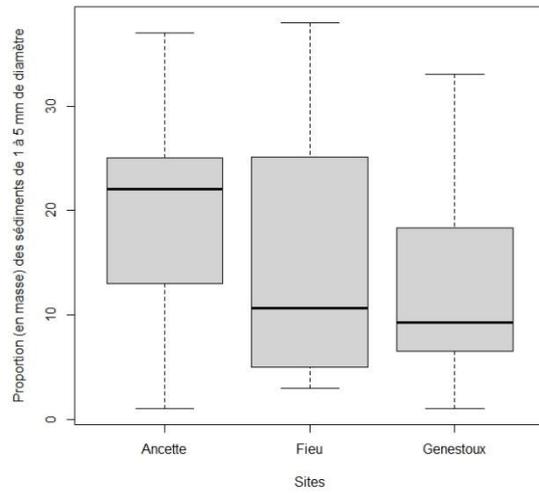


Figure 74 : Boîtes à moustaches de la proportion de sédiments de 1 à 5 mm de diamètre suivant les sites

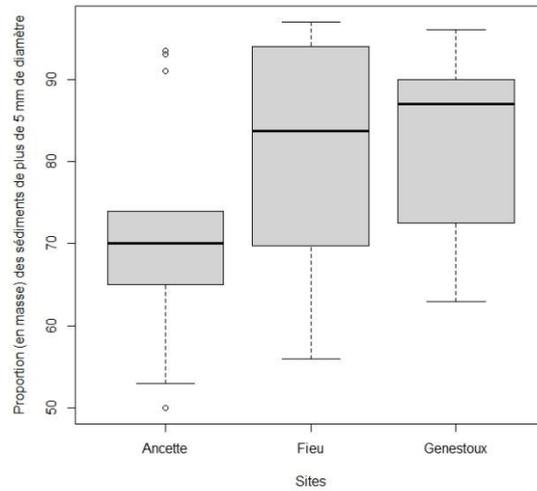


Figure 75 : Boîtes à moustaches de la proportion de sédiments de plus de 5 mm de diamètre suivant les sites

Tableau 17 : Groupes significativement distinct suivant le test de Tuckey suivant la proportion de granulométrie de 0,5 à 1 mm

Sites	Ancette	Fieu	Genestoux
Groupes	A		A
	B	B	

Tableau 18 : Groupes significativement distinct suivant le test de Tuckey suivant la proportion de granulométrie de 1 à 5 mm

Sites	Ancette	Fieu	Genestoux
Groupes	A	A	A

Tableau 19 : Groupes significativement distinct suivant le test de Tuckey suivant la proportion de granulométrie de plus de 5 mm

Sites	Ancette	Fieu	Genestoux
Groupes	A	A	A

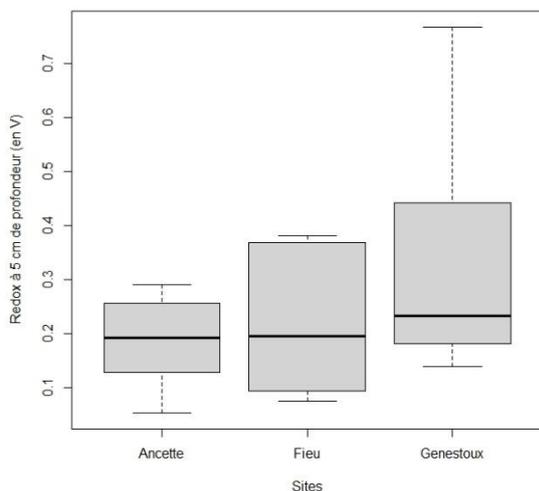


Figure 76 : Boîtes à moustaches des valeurs de redox à 5 cm de profondeur suivant les sites

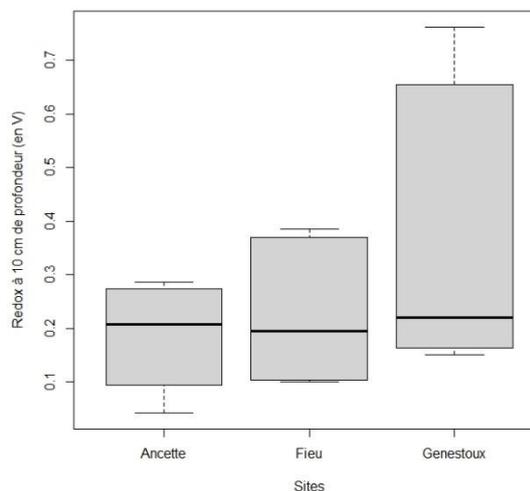


Figure 77 : Boîtes à moustaches des valeurs de redox à 10 cm de profondeur suivant les sites

5.2.1. Analyse de la physico-chimiques de l'eau

Malgré une grande variabilité de la qualité, il ressort des tendances par site et dans la globalité au cours du suivi qui s'est étalé de 2017 à 2021.

Ainsi, sur le site du Genestoux, on constate une tendance à la régression de la teneur du phosphore, de la turbidité et des nitrates principalement. Cette situation transparait avec la progression au fil des ans sur l'axe 1 (Figure 79 et Figure 80) et la contribution des variables sur cet axe (Tableau 20). Toutefois, cette tendance est peu évidente ($p = 0,063$), mais elle est modérément évidente pour les nitrites qui affichent une régression de $-0,01 \pm 0,00$ par an ($p = 0,040$) (Tableau 21).

Sur le site du Fieu, la tendance au fil des ans présente une faible évidence ($p = 0,080$) et il n'y a pas d'évidence sur le site de l'Ancette ($p = 0,324$).

Par contre, tous sites confondus, des tendances évidentes apparaissent alors ($p = 0,039$). L'ACP fait nettement ressortir une régression du phosphore et de la turbidité en particulier (Tableau 20). Prises une à une, les variables liées à la qualité de l'eau affichent des régressions modérément nettes pour certaines d'entre elles : DBO₅, Nitrites, Phosphates, Phosphore, Turbidité et pourcentage d'O₂ (Tableau 22). Toutes les variables concernées régressent au cours de la période de suivi.

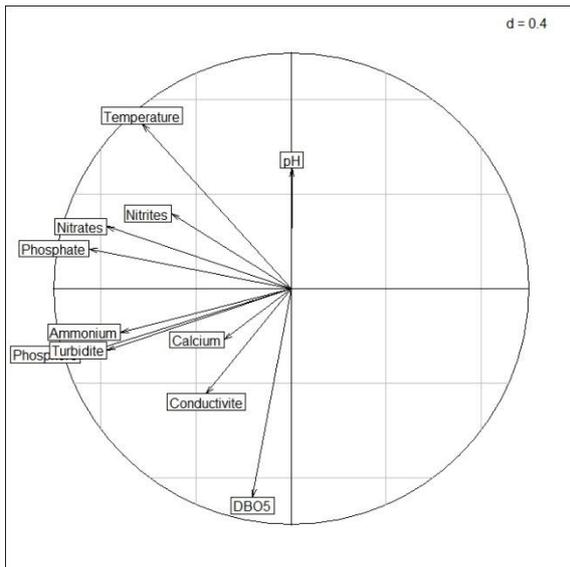


Figure 78 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau sur les Genestoux

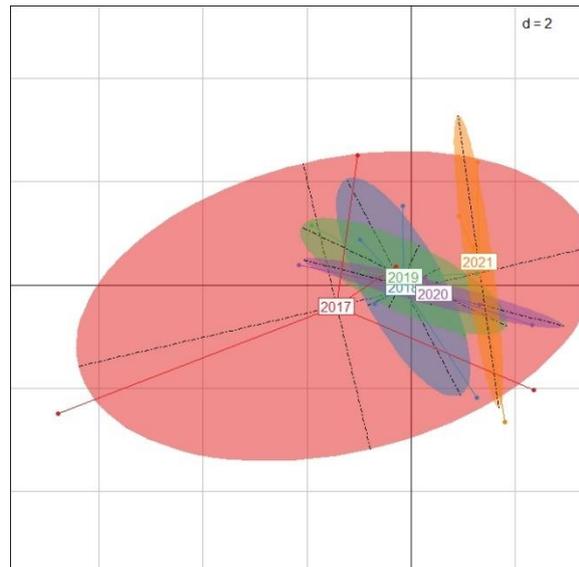


Figure 79 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP sur les Genestoux

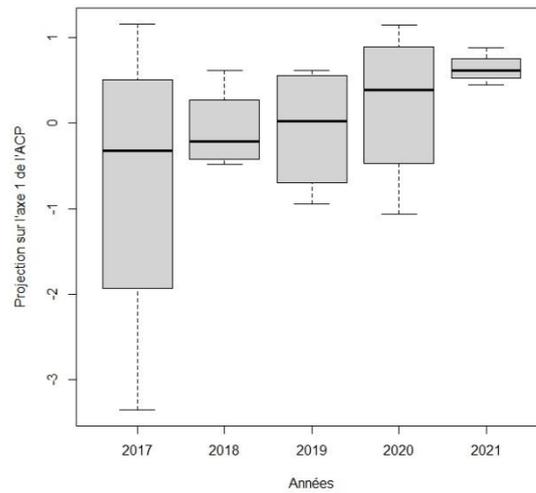


Figure 80 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP de la qualité de l'eau pour les Genestoux

Etude des populations de moule perlière sur le site Natura 2000 FR8302040
 « Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon »

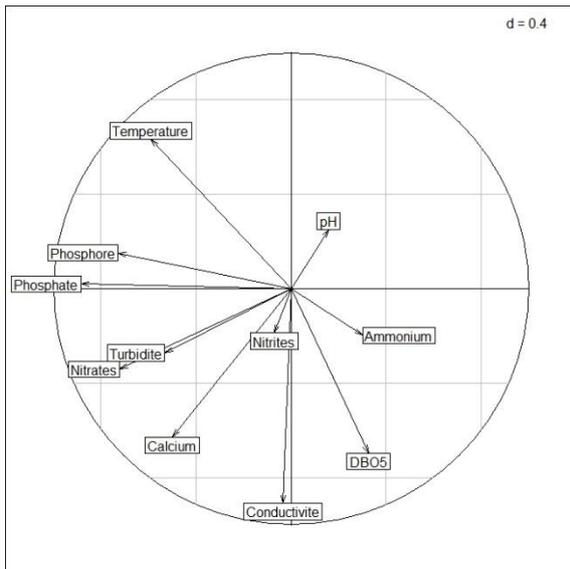


Figure 81 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau sur l'Ancette (rivière)

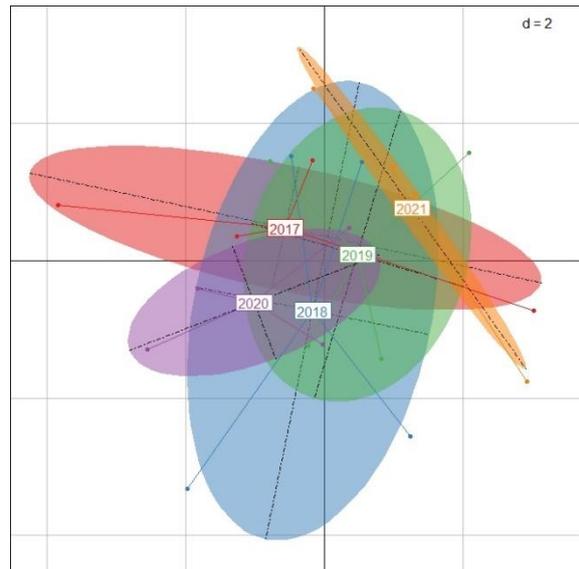


Figure 82 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP sur l'Ancette (rivière)

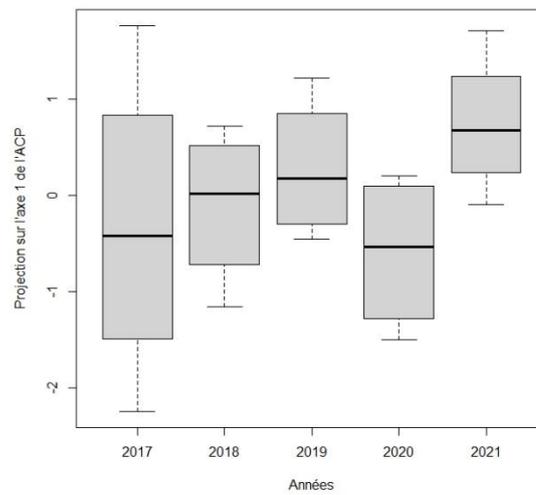


Figure 83 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP de la qualité de l'eau pour l'Ancette (rivière)

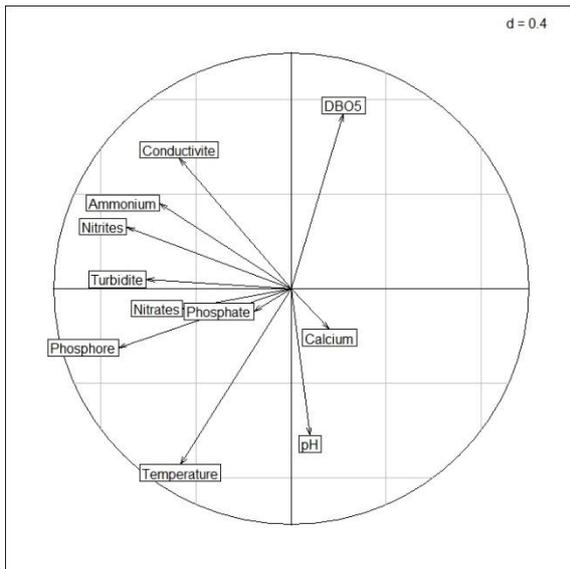


Figure 84 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau sur le Fieu

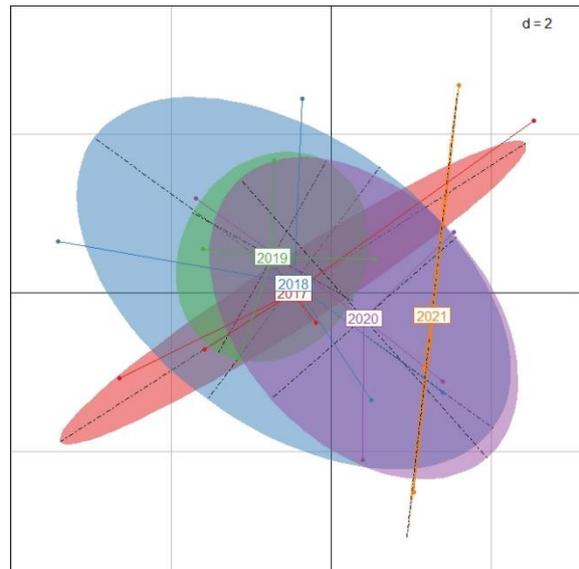


Figure 85 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP sur le Fieu

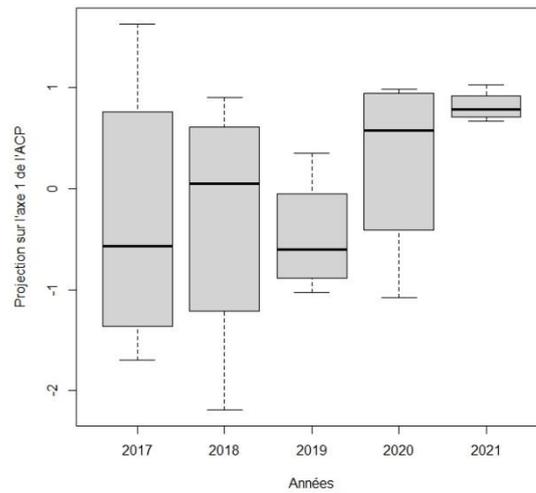


Figure 86 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP de la qualité de l'eau pour le Fieu

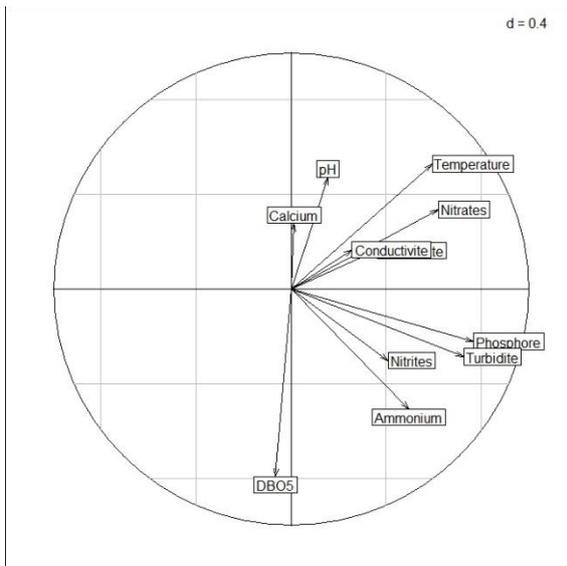


Figure 87 : Contribution des variables dans l'ACP de la qualité de l'eau portant sur la granulométrie suivant les sites

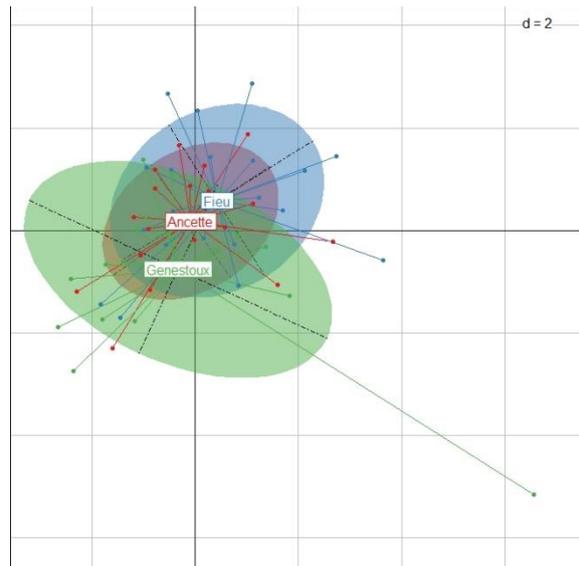


Figure 88 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les sites par l'ACP

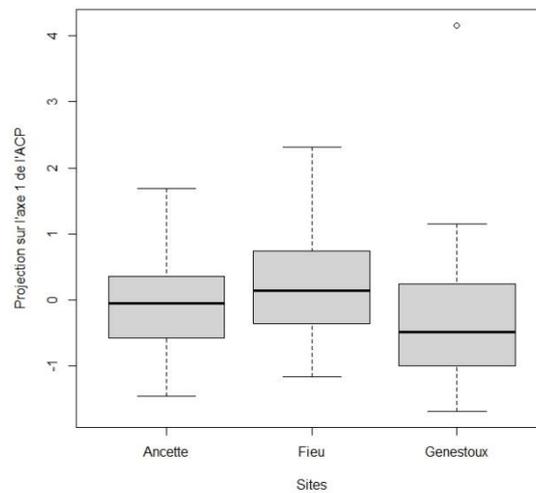


Figure 89 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP qualité de l'eau suivant les sites

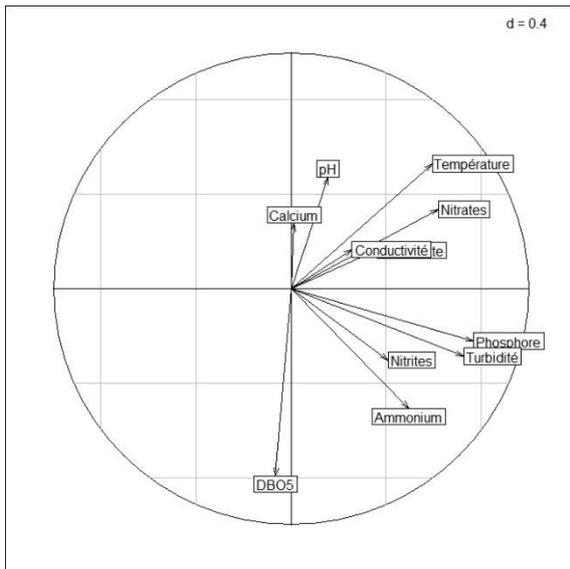


Figure 90 : Contribution des variables dans l'ACP portant sur la qualité de l'eau suivant les années

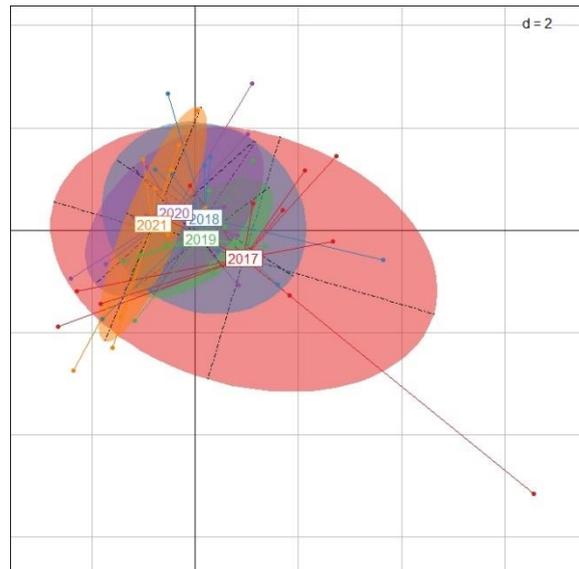


Figure 91 : Ellipses de la qualité de l'eau suivant les années par l'ACP suivant les années

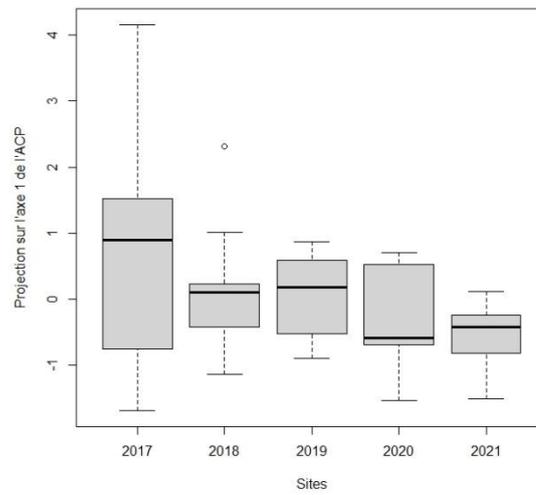


Figure 92 : Boîtes à moustaches des projections sur l'axe 1 de l'ACP qualité de l'eau suivant les années

Tableau 20 : Contributions relatives (en %) des variables sur l'axe 1 de l'ACP qualité de l'eau et tendances observées sur la période 2017-2021

	Ensemble des sites	Genestoux	Ancette	Fieu
p	0,039	0,063	0,324	0,080
Tendance	Négative	Positive	Positive	Positive
Phosphore	58,93	78,25	-52,81	-52,72
Turbidité	52,93	59,69	-28,06	-37,00
Nitrates	38,33	60,18	-51,79	-20,66
Température	35,28	39,14	-34,63	-21,56
Ammonium	24,62	51,31	9,07	-30,66
Nitrites	16,71	25,18	-0,49	-47,72
Phosphate	13,12	72,19	-77,86	-2,45
Conductivité	6,61	12,70	-0,12	-22,17
pH	2,44	0,00	2,48	0,66
Calcium	0,02	7,95	-24,83	2,62
DBO5	-0,42	2,60	10,60	4,91

Etude des populations de moule perlière sur le site Natura 2000 FR8302040
« Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon »

Tableau 21 : Tendances de chacune des variables de 2017 à 2021 en fonction de chacun des tronçons

Variables	Unités	Genestoux					Ancette					Fieu				
		Ord. à l'origine	IC	Coef. dir.	IC	P	Ord. à l'origine	IC	Coef. dir.	IC	P	Ord. à l'origine	IC	Coef. dir.	IC	p
Redox colonne d'eau	V	185,9	47,72	-0,09	0,02	0,031	36,77	36,20	-0,02	0,02	0,339	208,66	0,08	-0,10	0,05	0,081
Redox 5 cm	V	279,13	62,84	-0,14	0,03	0,002	36,94	34,14	-0,02	0,02	0,310	-112,40	137,42	0,06	0,07	0,459
Redox 10 cm	V	269,15	63,53	-0,13	0,03	0,003	35,85	38,15	0,02	0,02	0,377	-93,71	133,10	0,05	0,07	0,519
Substrat sup. à 5 mm	%	-6177,23	3923,83	3,10	1,94	0,135	1977,78	6873,64	-0,94	3,40	0,787	7642,18	6349,50	-3,745	3,145	0,268
Substrat 1 à 5 mm	%	2623,77	3372,41	-1,29	1,67	0,450	-3472,39	4995,47	1,73	2,47	0,499	-8075,69	5452,10	4,01	2,70	0,176
Substrat inf. à 1 mm	%	2508,70	1326,03	-1,24	0,66	0,080	382,51	2813,41	-0,19	1,39	0,897	-557,69	748,67	0,28	0,37	0,476
DBO5	mgO2/L	304,08	187,07	-0,15	0,09	0,123	167,63	164,37	-0,08	0,08	0,324	134,86	175,96	-0,07	0,09	0,457
Ammonium	mg/L	2,54	4,07	-0,00	0,00	0,543	-1,05	2,64	0,00	0,00	0,693	1,78	3,45	-0,00	0,00	0,615
Nitrates	mg/L	259,85	209,76	-0,13	0,10	0,236	43,41	276,93	-0,02	0,14	0,886	255,52	271,33	-0,13	0,13	0,365
Nitrites	mg/L	17,94	8,1	-0,01	0,00	0,040	2,18	1,47	-0,01	0,00	0,157	2,09	1,76	-0,00	0,00	0,266
Phosphates	mg/L	9,18	9,21	-0,00	0,00	0,334	6,75	6,75	-0,00	0,00	0,33	97,77	51,93	-0,05	0,03	0,076
Phosphore	mg/L	35,86	26,29	-0,02	0,01	0,190	20,71	17,67	-0,01	0,01	0,258	22,98	15,45	-0,01	0,01	0,155
Calcium	mg/L	256,10	226,14	-0,13	0,11	0,279	55,05	431,54	-0,03	0,21	0,908	3440,46	4253,09	-1,70	2,11	0,430
Turbidité	NFU	1791,07	987,71	-0,89	0,49	0,097	906,48	737,01	-0,45	0,37	0,236	1086,01	940,88	-0,54	0,47	0,265
pH		11,3	102,92	-0,00	0,05	0,969	-20,98	86,99	0,01	0,04	0,749	-87,39	130,83	0,05	0,06	0,478
Conductivité	µS/cm	2101,36	1138,78	-1,02	0,56	0,089	-3,12	2344,03	0,03	1,16	0,976	4866,14	3982,82	-2,37	1,97	0,245
Température	°C	1288,84	1278,82	-0,63	0,63	0,331	1244,46	1481,13	-0,61	0,73	0,417	1133,65	1488,77	-0,55	0,74	0,461
Pourcentage d'O ₂	% sat	1872,42	1003,62	-0,88	0,50	0,095	842,52	819,66	-0,37	0,41	0,380	1449,65	1294,37	-0,67	0,64	0,312
Taux d'oxygène	mg/L	-168,65	301,71	0,09	0,15	0,561	-265,66	331,89	0,14	0,16	0,417	-181,78	319,96	0,10	0,16	0,556

Ord. A l'origine = ordonnée à l'origine ; IC = Intervalle de confiance ; Coef. dir. = coefficient directeur ; p = probabilité – En gras : tendances significatives au seuil de 5 %

Tableau 22 : Tendances de chacune des variables de 2017 à 2021 pour l'ensemble des sites

Variables	Unités	Par an				
		Ord. à l'origine	IC	Coef. dir.	IC	P
Redox colonne d'eau	V	134,566	37,395	-0,067	0,019	0,001
Redox 5 cm	V	132,269	0,006	-0,065	0,022	0,006
Redox 10 cm	V	126,419	44,521	-0,062	0,022	0,009
Substrat sup. à 5 mm	%	918,775	3391,235	-0,417	1,680	0,806
Substrat 1 à 5 mm	%	-2651,574	2633,113	1,321	1,304	0,318
Substrat inf. à 1 mm	%	677,065	1181,413	-0,333	0,585	0,573
DBO5	mgO2/L	202,192	99,469	-0,100	0,049	0,048
Ammonium	mg/L	1,091	1,955	-0,001	0,001	0,584
Nitrates	mg/L	186,259	153,944	-0,091	0,076	0,238
Nitrites	mg/L	7,383	3,052	-0,004	0,002	0,019
Phosphates	mg/L	37,898	18,651	-0,019	0,009	0,047
Phosphore	mg/L	26,516	11,385	-0,013	0,006	0,023
Calcium	mg/L	1250,537	1437,697	-0,617	0,712	0,390
Turbidité	NFU	1261,189	501,546	-0,623	0,248	0,015
pH		-32,356	63,933	0,020	0,032	0,537
Conductivité	µS/cm	2321,460	2712,572	-1,117	1,344	0,409
Température	°C	1222,318	797,720	-0,599	0,395	0,135
Pourcentage d'O ₂	% sat	1388,196	603,324	-0,638	0,299	0,037
Taux d'oxygène	mg/L	-205,362	177,500	0,107	0,088	0,230

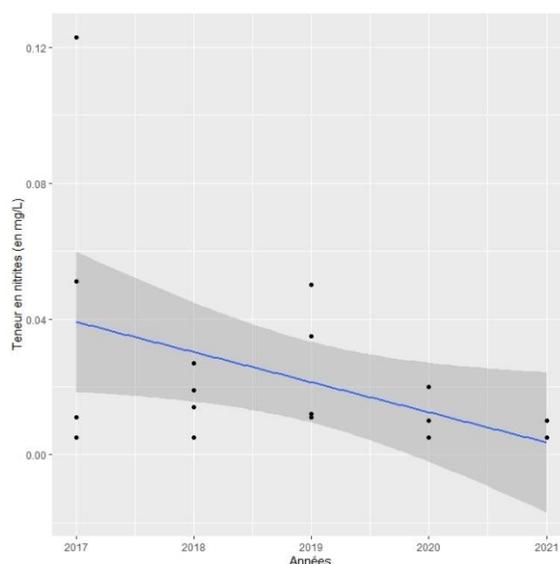


Figure 93 : Graphique de la tendance significative à la baisse du taux de nitrites (mg/L)

5.3. Discussion

En premier lieu, il est nécessaire de préciser que le site de l'Ancette ne connaît pas de régression du nombre de mulettes perceptible dans le cadre du suivi qui a été effectué sur 5 ans (de 2017 à 2021 ; VRIGNAUD 2021). A l'inverse, les sites des Genestoux et du Fieu montrent une disparition modélisée à une échelle d'une dizaine d'année.

L'analyse de la granulométrie ne peut être que nuancée du fait qu'elle ne repose que sur 3 sites et un faible nombre de relevés (1 à 3 relevés par an suivant les sites). Toutefois, il se dessine que l'Ancette possède modérément moins de particules de plus de 5 mm que sur les Genestoux et le Fieu et se trouve dans une situation intermédiaire entre les deux pour les particules de 0,5 à 1 mm de diamètre.

Il paraît difficile de corréliser la situation intermédiaire du site de l'Ancette au regard des exigences biologiques de la moulette perlière. En effet, les jeunes moules insérées dans le substrat sont sensibles au colmatage et très probablement à l'instabilité sédimentaire bien que cela n'ait pas (encore) été clairement prouvé. Les sédiments d'un diamètre inférieur à 1 mm restent encore très fins (sable) et vraisemblablement trop fins pour permettre un redox suffisamment élevé pour les jeunes individus.

Sur le site de l'Ancette, les sédiments grossiers (de plus de 5 mm) occupent proportionnellement une surface plus faible. A l'inverse, sur les Genestoux et le Fieu, les sédiments fins sont beaucoup plus présents. Du fait que tous ces sites soient sur la même rivière, on peut conclure que les sédiments fins des Genestoux et du Fieu ont été balayés par le courant reflétant ainsi une force de charriage plus élevée sur ces deux derniers sites.

En effet, une force de charriage faible tendra à favoriser les sédiments fins au détriment des grossiers à l'inverse d'une force de charriage importante qui favorisera les sédiments les plus grossiers (Tableau 23). Ainsi, cette force de charriage pourrait expliquer localement la régression nette ou le maintien apparent des effectifs de moulette perlière. Cela ne reste toutefois qu'une hypothèse qui ne peut pas être vérifiée à cette échelle du fait du faible nombre d'échantillons.

Tableau 23 : Tendances observées et hypothèses d'explications des variations d'effectifs de mulettes perlières suivant les sites suivis

Sites		Ancette	Genestoux - Fieu
Tendance des effectifs		Maintien apparent	Régression perceptible (à l'échelle de 10 ans)
Force de charriage		Faible	Elevée
Proportion de...	Sédiments fins	Forte	Faible
	Sédiments « moyens »	Moyenne	Moyenne
	Sédiments grossiers	Faible	Forte

Le fait que le redox diminue nettement quelle que soit la profondeur sur le site des Genestoux et dans la globalité complique encore plus la survie des jeunes mulettes. Il paraît difficile d'expliquer les raisons de cette diminution. Cela ne semble pas lié à l'évolution de la proportion de sédiments fins car ceux-ci ne montrent pas de variation nette. En outre, cette diminution plus importante dans les sédiments par rapport à la colonne d'eau (coefficient directeur de $-0,09 \pm 0,02$ pour la colonne d'eau contre $-0,14 \pm 0,03$ et $-0,13 \pm 0,03$ respectivement pour 5 et 10 cm de profondeur) pour le site des Genestoux révèle une amplification du phénomène au niveau des sédiments, car dans la globalité, les coefficients directeurs demeurent semblables sur l'ensemble des sites entre la colonne d'eau et les profondeurs de 5 et 10 cm.

De même la diminution évidente du taux de nitrites aux Genestoux paraît difficilement explicable. Il est possible que cela soit lié à une réduction des effluents domestiques provenant du hameau des Genestoux mais pour autant, les autres indicateurs ne connaissent pas de variations évidentes permettant d'éclairer cette situation.

Sur les sites étudiés pris un à un dans le cadre de cette partie, il n'est pas possible de dégager des variations nettes de la qualité de l'eau (indicateurs physico-chimiques) à l'exception du taux de nitrites qui affiche une régression sur le site des Genestoux ($-0,01 \pm 0,00$ par an). Par contre, à l'échelle globale, une amélioration de la qualité de l'eau peut être constatée (avec la diminution d'indicateurs de pollution organique : DBO5, nitrites, phosphates, phosphore, turbidité).

Au regard des différents indicateurs pris en compte dans le cadre du suivi sur les 3 sites (Genestoux, Ancette et Fieu), un effet évident des efforts fournis dans le cadre du contrat de rivière peut être constaté sur la globalité. Les différents aménagements tels que la mise en défens de la rivière, les abreuvoirs notamment contribuent bénéfiquement à la qualité de l'eau. Les effets auraient été encore plus nets si les mesures avaient été prises à proximité des aménagements. Plus largement, les politiques d'amélioration de l'assainissement autonome et collectif et très certainement le raisonnement des pratiques agricoles semblent porter leurs fruits sur ce critère.

Toutefois, bien que la qualité de la colonne d'eau s'améliore, celle de l'eau interstitielle se dégrade. En effet, la régression de l'indicateur d'oxygénation des sédiments (redox) et donc la perméabilité de ceux-ci témoigne d'une altération de ce compartiment. Dans le contexte acide des rivières à moulettes perlières, le colmatage sédimentaire est physique (apport de fines) et / ou biologique (développement d'un floc bactérien sur la surface des sédiments à la faveur de la charge nutritionnelle de l'eau). Dans le cas présent, avec la diminution de la pollution organique, la dégradation de la perméabilité sédimentaire est désormais principalement due à l'apport de sédiments fins. Une étude fine de ces apports semble donc très utile afin d'améliorer les conditions habitationnelles de la moulette perlière, espèce parapluie.

Enfin, les indicateurs mis en œuvre dans le cadre de cette étude ne permettent pas d'appréhender convenablement la stabilité et la disponibilité sédimentaire ainsi que l'évolution de ces critères.

6. Etude cartographique

Introduction

L'identification des paramètres locaux liés au colmatage, à la disponibilité sédimentaires et l'instabilité sédimentaire ne permet pas d'appréhender les facteurs humains à l'origine de ces perturbations. Ces facteurs sont principalement liés à l'occupation du sol et les pratiques qui y sont associées. C'est pourquoi, cette étude vise à identifier l'effet de l'occupation du sol sur la moulette perlière ainsi que sur les conditions habitationnelles la régissant.

6.1. Méthodologie

6.1.1. Plan d'échantillonnage

Sur les 60 tronçons (49 pour l'Ance et 11 pour l'Arzon ; 41 avec des mulettes et 19 sans) qui ont fait l'objet de relevés de variables locales (VRIGNAUD *et al.*, 2019), une approche d'ordre cartographique a été adoptée (Figure 95). Les tronçons avec mulettes pour l'Ance sont ceux où Gilbert COCHET en avait observé (période 1998-2003). Pour chacun de ces points, une analyse du **bassin versant** a été faite sur les 2 000 m amont pour déterminer l'effet de l'occupation du sol (surface agricole, forestière et type de forêt, ripisylve...) et de la pente sur des bandes tampon de largeurs variables (*cf.* ci-dessous). Cela permet d'identifier les facteurs intervenant le plus dans le colmatage et l'instabilité sédimentaire à l'échelle du bassin versant.

La première approche a consisté à analyser les facteurs régissant la présence / absence sur l'ensemble des bassins versants. Puis, elle a consisté à comparer les secteurs où l'espèce avait disparu avec ceux où l'espèce subsiste. Et enfin au pourcentage de variation d'effectifs entre les relevés de Gilbert COCHET en 1998-2003 et de Sylvain VRIGNAUD en 2018 (VRIGNAUD, 2018). Toutefois, ces deux dernières approches ne concernent que l'Ance du nord pour laquelle des données antérieures sont disponibles.

Tableau 24 : Effectifs et proportion des situations d'évolution de densité de mulettes perlières sur l'Ance du nord ayant servi d'échantillons (comparaison entre 1998-2003 et 2018 ; Vrignaud, 2018)

Situation	Effectifs	Proportion
Maintien	105	30,61%
Régression	140	40,82%
Sans mulette	98	28,57%

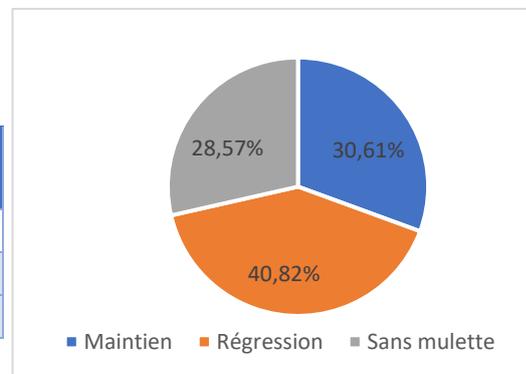


Figure 94 : Proportion des différentes situations des densités de mulettes perlière sur l'Ance du nord et ayant servi d'échantillon (comparaison entre 1998-2003 et 2018 ; VRIGNAUD, 2018)

Ces résultats permettent alors d'identifier les variables les plus explicatives portant atteinte à la moulette et son habitat et ainsi de hiérarchiser la remédiation de ces facteurs. L'objectif de cette phase est d'obtenir le maximum d'efficacité (écologie intégrative).

6.1.2. Cartographie

L'acquisition de données cartographiques a porté sur 24 variables regroupées suivant le Tableau 25.

Tableau 25 : Variables géographiques et origine des données

Catégorie regroupée	Catégorie initiale	Origine de la donnée
Conifères	Forêt fermée à mélange de conifères	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée de conifères purs en îlots	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée de douglas pur	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée de mélèzes purs	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée de pins sylvestres purs	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée de sapin ou épicéa	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt ouverte de conifères purs	IGN - BD Forêt V2 2008
Feuillus	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt fermée de feuillus purs en îlot	IGN - BD Forêt V2 2008
Forêt indéterminée	Bois	IGN - BD Forêt V2 2008 + BD Topo
	Forêt fermée sans couvert arboré	IGN - BD Forêt V2 2008
	Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères	IGN - BD Forêt V2 2008
Culture	Culture	RPG (édition 2019)
Haie	Haie	IGN - BD Topo (flux WFS)
Lande	Lande ligneuse	IGN - BD Topo (flux WFS)
Milieu aquatique	Milieu aquatique	IGN - BD Topo (flux WFS)
Prairie permanente	Prairie permanente	RPG (édition 2019)
Prairie temporaire	Prairie temporaire	RPG (édition 2019)
Zone artificielle	Zone artificielle	Création
Pente (moyenne)	Pente (moyenne)	IGN - RGE ALTI® 5 m
Pente (minimale)	Pente (minimale)	IGN - RGE ALTI® 5 m
Pente (maximale)	Pente (maximale)	IGN - RGE ALTI® 5 m

* Uniquement sur l'Ance du nord

En outre, pour le relief, la taille des mailles ayant permis de définir les pentes (minimales, moyennes et maximales) est de 5 m de côté.

Ces variables géographiques ont été étudiées sur différentes bandes tampons s'éloignant progressivement de la rivière (0 à 10 m, 10 à 20 m, 20 à 50 m, 50 à 100 m, 100 à 140 m, 140 à 200 m et 200 à 250 m) (Figure 96).

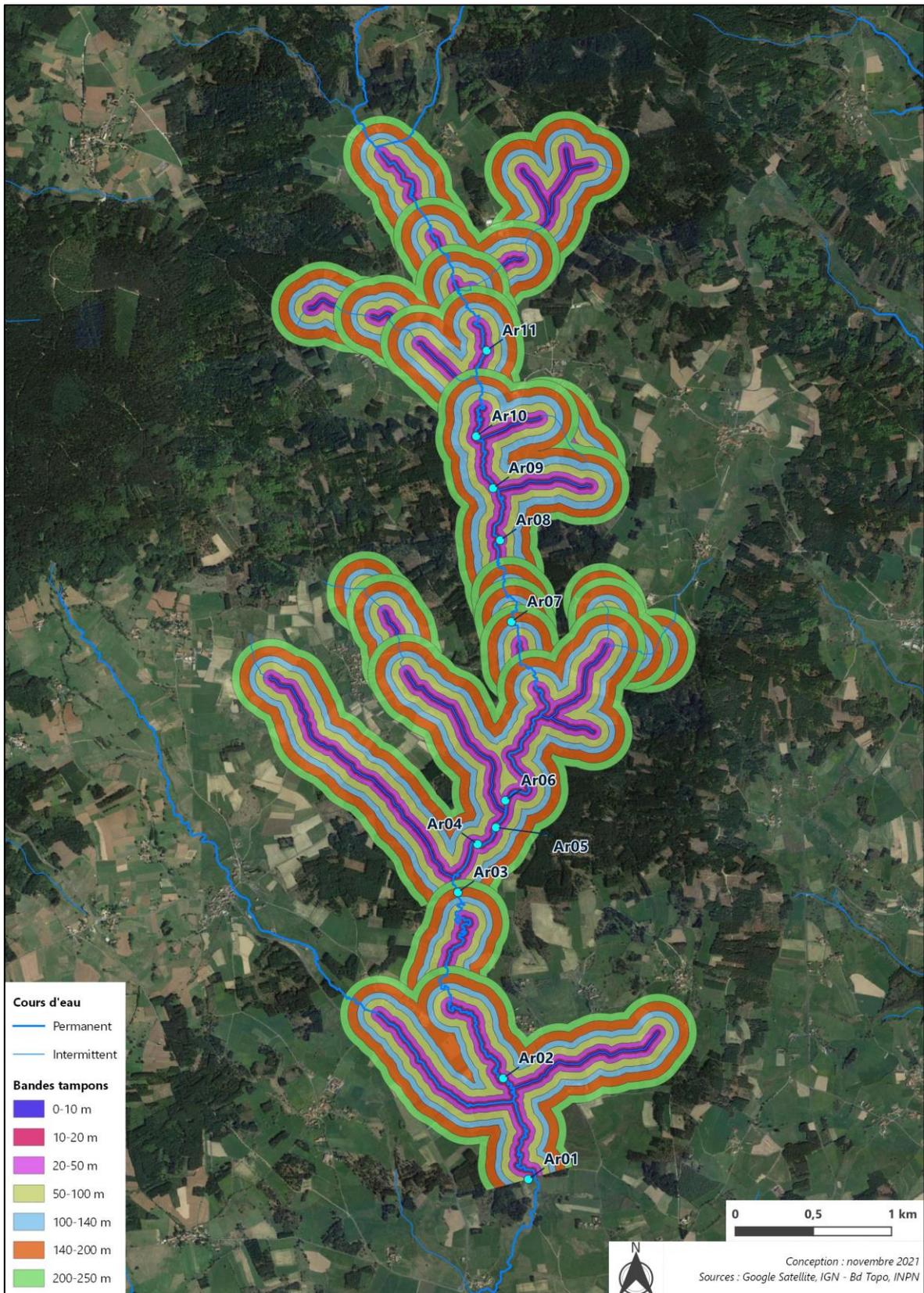


Figure 96 : Disposition des différentes zones tampons (exemple de l'Arzon)

6.1.3. Statistiques

L'analyse statistique repose en premier suivant un test des variables reposant sur des hypothèses biologiques. En effet, il a été démontré que le colmatage des sédiments affecte les populations de moulette perlière (GEIST & AUERSWALD, 2007). En outre, l'instabilité sédimentaires est fortement soupçonnée de contribuer, elle aussi, à la mise en péril de l'espèce (VRIGNAUD, 2018).

Afin de répondre au premier aspect du colmatage, les hypothèses reposent sur la fourniture de sédiments fins avec des pentes fortes et des occupations du sol fortement pourvoyeuses en sédiments fins. Pour ces dernières, les milieux ouverts ou anthropisés et couvrant une grande surface ont été testés : cultures, les prairies (prairies permanentes et temporaires) et les forêts de conifères.

A l'inverse des surfaces sont susceptibles d'être moins pourvoyeuses : les pentes faibles (minimales), les forêts de feuillus et encore plus, des forêts de feuillus sur pente faibles. Enfin, et par contraste, les forêts de feuillus doivent avoir un rôle stabilisateur des pentes maximales (à l'inverse des milieux ouverts tels que des cultures ou des prairies sur pente raide).

Ainsi, des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été testés avec les variables explicatives de façon additives (+) ou en interaction (x) suivants les modèles du Tableau 26.

Tableau 26 : GLM testés pour apprécier l'effet des milieux ouverts ou anthropisés suivant les pentes comme potentiellement impactant la moulette perlière en fournissant ou pas des sédiments fins

Référence du modèles	Détail du modèle	Hypothèse / commentaire
P_{maxi}	Pente maximale	Surface supposée fournisseuse en sédiments notamment fins donc moins favorable à la moulette perlière (cf. colmatage)
P_{maxi} x S_{CON}	Pente maximale x proportion de surface en forêts de conifères	
P_{maxi} x S_{PP}	Pente maximale x proportion de surface en prairie permanente	
P_{maxi} x S_{PT}	Pente maximale x proportion de surface en prairie permanente + et x proportion de surface en prairie temporaire	
P_{maxi} x S_{CULT}	Pente maximale x proportion de surface en cultures	
P_{mini}	Pente minimale	Surface supposée comme étant peu pourvoyeuse de sédiments fins donc plus favorable à la moulette perlière (moins de colmatage)
S_{FEU}	Proportion de surface en feuillus	
P_{mini} x S_{FEU}	Pente minimale x Proportion de surface en feuillus	
P_{max} x S_{FEU}	Pente maximale x proportion de surface en feuillus	Par contraste supposé à P_{maxi} x S_{CULT}

Concomitamment, des gradients de fermeture du milieu et de travail du sol ont été intégrés dans l'analyse. Ils reposent sur les axes 1 et 2 de l'ACP (Analyse de Composantes Principales) pour l'ensemble de la bande de 0 à 250 m ainsi que pour les bandes tampons intermédiaires. Cette ACP inclut les variables : forêts de conifères, de feuillus, prairies permanentes, temporaires et cultures. L'axe correspondant aux variables allant de prairies permanentes à forêt de conifères reflète la fermeture du milieu et celui allant des prairies temporaires et cultures à forêts de feuillus correspond

au travail du sol. Ces axes ont ensuite été testés avec la pente maximale en interaction (x) par des GLM. Leurs analyses reposent sur l'examen visuel des courbes.

Ces modèles ont été testés sur l'ensemble du bassin versant et indépendamment sur les bandes tampons. Ces GLM (suivant une distribution logit) possèdent une équation qui figure ci-dessous (Équation 1).

Équation 1 : Equation de la modélisation de la probabilité de présence (modèle logit)

$$f(x) = \frac{e^x}{1 + e^x}$$

Avec x comme variable explicative et f(x) la probabilité de présence.

Afin de prendre en compte les corrélations entre variables, des matrices de corrélations ont été élaborées pour chacune des bandes tampons (cf. annexe 5). Si le coefficient de Pearson excède 0,5, les axes 1 et 2 de l'analyse de composante principale ont été inclus dans le choix de modèles.

Par ailleurs et spécifiquement pour la bande tampon de 0 à 10 m, l'hypothèse testée repose sur l'effet du développement de la strate arborée et de son effet sur le contingentement de la rivière. Il a en effet été démontré l'effet de la ripisylve sur l'incision de la rivière (VRIGNAUD *et al.*, 2016). De plus, l'énergie potentielle spécifique dépend notamment et en particulier de la pente de la rivière (WASSON *et al.*, 1998). C'est pourquoi, la pente de la rivière sur les 200 mètres amont et grâce aux données de BD TOPO IGN a été intégrée. Ainsi, différents modèles additifs (+) et en interaction (x) ont été testés (Tableau 27).

Tableau 27 : GLM testés pour apprécier l'effet de la ripisylve et de la pente de la rivière sur la moulette perlière (bande tampon de 0 à 10 m)

Référence du modèle	Détail du modèle	Hypothèse
S _{HAIE} x P _{riv}	Proportion de surface en haie + et x Pente de la rivière	L'effet des arbres et de leurs racines accentué par la pente contingentent la rivière et favorisent l'instabilité sédimentaire néfaste à la moulette perlière
S _{FEUIL} x P _{riv}	Proportion de surface en forêt de feuillus + et x Pente de la rivière	
S _{CON} x P _{riv}	Proportion de surface en forêt de conifères + et x Pente de la rivière	
S _{ligneux} x P _{RIV}	Proportion de surface en ligneux (forêt de feuillus + conifères + forêt indéterminée + haie) + et x Pente de la rivière	

La sélection du meilleur modèle linéaire généralisé prédictif et additif repose en partie sur l'indice de parcimonie (AIC). Le modèle privilégié est celui possédant le plus faible AIC en considérant que les modèles avec une différence d'AIC (delta) inférieure à 2 sont semblables (Burnham & Anderson 2002). En cas de différence d'AIC inférieure à 2, le modèle le plus simple (c'est-à-dire présentant le moins de paramètres) est préféré. Par ailleurs, la probabilité a aussi été prise en compte. Celle-ci a été appréhendée non pas au seuil de 5 %, mais avec une vision progressive suivant les recommandations de MUFF *et al.* (2021).

Les modèles en interaction ont été sélectionnés à partir de l'analyse visuelle des interactions et de la faible étendue de l'intervalle de confiance. Le sens de la courbe (positif ou négatif) ainsi que le pourcentage de variance expliqué ont alors été retenus.

En outre, afin de ne pas occulter complètement un effet de l'occupation du sol qui ne pourrait pas être pris en compte par les hypothèses biologiques émises ci-dessus, des analyses de composante principale (ACP) et discriminantes ont été testées avec l'occupation du sol pour chacune des bandes tampon et l'ensemble du bassin versant. La probabilité de discrimination inter-classe a été testée à l'aide du test de Monte-Carlo à 999 répétitions. En cas de réelles probabilités de corrélation, les variables les plus discriminantes ont été testées une à une, isolément.

Enfin, la dernière analyse repose sur les situations différentes qui avaient été constatées spécifiquement sur l'Ance issues de comparaison entre les données de VRIGNAUD (2018) avec les données de Gilbert Cochet datant de 1998 à 2003 (VRIGNAUD 2018). 3 situations apparaissent : le maintien de la présence entre ces deux périodes, l'absence sur ces deux périodes et la disparition entre la première et la dernière période. La modélisation se base sur un code 0 en cas d'absence et 1 en cas de présence. En outre, cette modélisation cherche à savoir si les hypothèses précédentes (Tableau 26 et Tableau 27) aggravent la disparition.

Enfin, le maintien des densités, la régression et l'absence de mulettes (pour chacune des études) ont fait l'objet d'une comparaison à partir de la projection sur le 1^{er} axe des ACP pour chacune des bandes tampon et pour chacune des situations (maintien, régression ou absence de mulette). Cette comparaison a été effectuée à l'aide d'un test de Tuckey permettant de séparer des groupes statistiquement différents si un test préalable de Kruskal-Wallis se révélait significatif. Ce test permet en cas de significativité de traduire une différence réelle entre des valeurs catégorielles.

Enfin, la contribution des hypothèses émises sur le maintien de la mulette perlière a été testée à partir des données issues de M. Cochet et de Vrignaud (2018). Le raisonnement adopté est qu'un maintien vaut « 1 » et qu'une disparition (ou quasi disparition) localisée vaut « 0 ».

L'analyse des données a été réalisée avec le package « ade4 » (pour les ACP) (DRAY & DUFOUR, 2007) et « agricolae » (pour le test de Tuckey) (DE MENDIBURU, 2021). Les illustrations graphiques ont été élaborées avec « FactoMineR » (LE *et al.*, 2008), « GGplot » et « visreg » (BREHENY & BURCHETT, 2017), « ggeffects » (LÜDECKE, 2018) sur le logiciel R (R CORE TEAM, 2020).

6.2. Résultats

6.2.1. Description des variables

25 Variables ont été identifiées : 21 concernent l'occupation du sol et 3 portent sur la pente (minimale, maximale et moyenne). Les valeurs de chacune de ces variables sont reprises dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Moyennes et bornes de l'intervalle de confiance des différentes variables géographiques sur l'ensemble des bandes tampon

Variables	Moyenne	Intervalle de confiance	
		Borne minimale	Borne maximale
Prairie permanente	34,09	32,40	35,78
Forêt fermée à mélange de conifères	18,53	17,02	20,04
Forêt fermée de pins sylvestres purs	13,04	11,83	14,24
Culture	5,49	4,94	6,03
Forêt fermée de sapin ou épicéa	5,29	4,34	6,25
Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus	4,74	4,01	5,48
Prairie temporaire	3,92	3,56	4,29
Zone artificielle	3,32	3,06	3,58
Haie	2,44	2,03	2,84
Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants	2,35	1,68	3,02
Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères	2,32	1,74	2,90
Lande ligneuse	1,09	0,96	1,22
Bois	1,04	0,93	1,14
Forêt fermée de conifères purs en îlots	0,90	0,72	1,08
Milieu aquatique	0,88	0,58	1,17
Forêt fermée de feuillus purs en îlot	0,36	0,12	0,60
Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères	0,09	0,03	0,15
Forêt fermée de douglas pur	0,08	0,05	0,11
Forêt ouverte de conifères purs	0,02	-	-
Forêt fermée sans couvert arboré	0,01	0,00	0,03
Forêt fermée de mélèzes purs	0,01	-	-
Pente (moyenne) en pourcentage	16,99	16,27	17,71
Pente (minimale) en pourcentage	0,11	0,10	0,12
Pente (maximale) en pourcentage	92,35	88,55	96,14

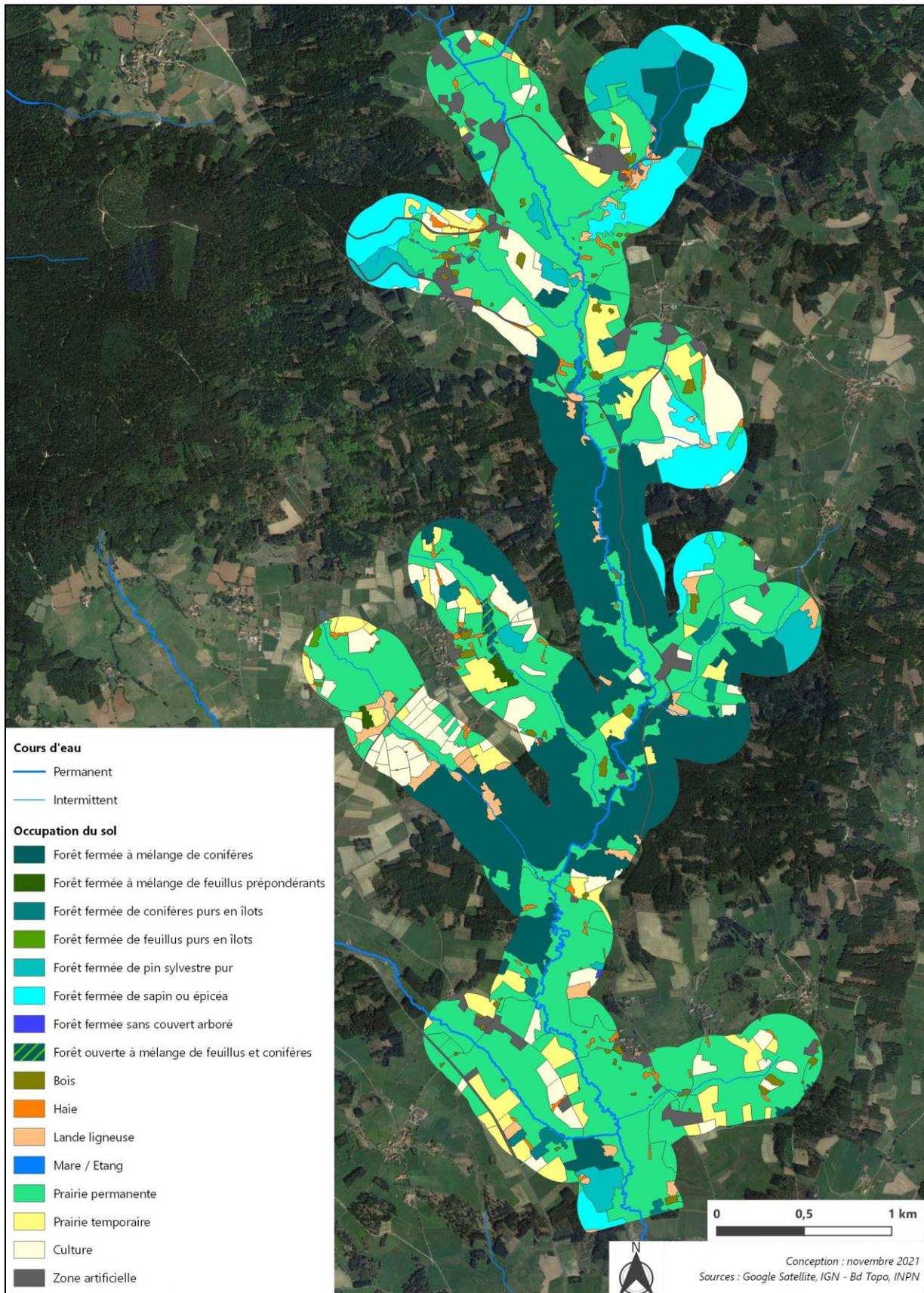


Figure 97 : Occupation du sol sur l'étendue maximale des zones tampons (250 m) (exemple de l'Arzon)

Dans un souci de simplification pour l'interprétation des résultats, ces mêmes variables (et en particulier forestières) ont été fusionnées (Tableau 29). Ce sont donc 14 catégories qui ont été étudiées.

Tableau 29 : Liste des catégories regroupées

Catégorie regroupée	Catégorie initiale
Conifères	Forêt fermée à mélange de conifères
	Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus
	Forêt fermée de conifères purs en îlots
	Forêt fermée de douglas pur
	Forêt fermée de mélèzes purs
	Forêt fermée de pins sylvestres purs
	Forêt fermée de sapin ou épicéa
	Forêt ouverte de conifères purs
Feuillus	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants
	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères
	Forêt fermée de feuillus purs en îlot
Forêt indéterminée	Bois
	Forêt fermée sans couvert arboré
	Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères
Culture	Culture
Haie	Haie
Lande	Lande ligneuse
Milieu aquatique	Milieu aquatique
Prairie permanente	Prairie permanente
Prairie temporaire	Prairie temporaire
Zone artificielle	Zone artificielle
Pente (moyenne)	Pente (moyenne)
Pente (minimale)	Pente (minimale)
Pente (maximale)	Pente (maximale)

➤ *A l'échelle des bassins versants*

A l'échelle des bassins versants étudiés, les forêts de conifères occupent la plus grande part avec 43% (Figure 98). Puis, les prairies permanentes concernent 34 % des surfaces. A elles deux, les forêts de conifères et les prairies permanentes couvrent près des trois quarts des bassins versants étudiés (77 %). Les surfaces restantes demeurent limitées au maximum à 6 % pour les cultures, puis on trouve d'autres habitats principalement agricoles (prairies temporaires, haies et landes ligneuses) ou sylvicoles (forêts de feuillus et indéterminées). Les surfaces artificielles occupent 3 % et les milieux aquatiques 1 %.

Enfin, il existe peu de variabilité dans l'occupation du sol sur l'ensemble des bassins versants révélant ainsi une relative homogénéité du paysage à l'échelle du territoire (Tableau 30).

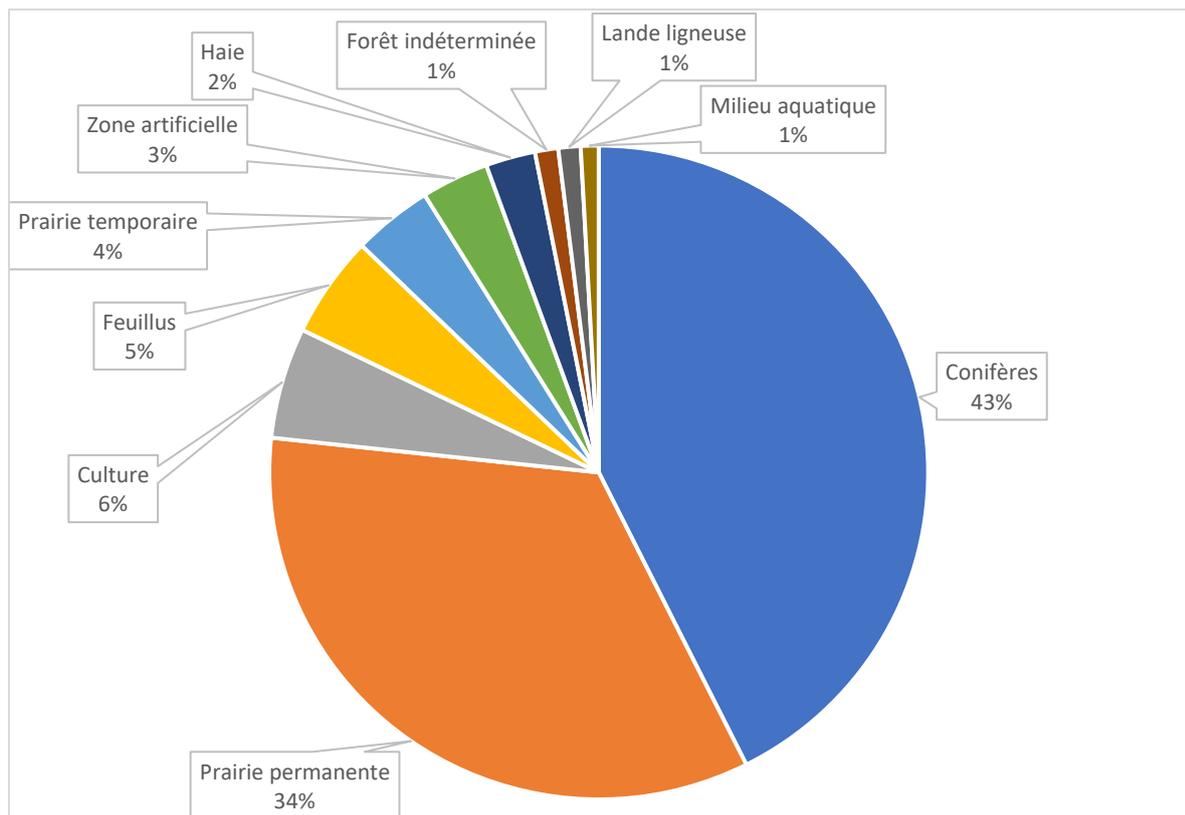


Figure 98 : Pourcentage de surfaces couvertes suivant l'occupation du sol à l'échelle des bassins versants de l'Ance du nord et de l'Arzon

Tableau 30 : Pourcentage moyen de recouvrement et intervalle de confiance des différentes occupations du sol à l'échelle de l'ensemble des bassins versants de l'Ance du nord et de l'Arzon

Type d'occupation du sol	Pourcentage moyen de recouvrement	Intervalle de confiance	Borne inférieure de l'intervalle de confiance	Borne supérieure de l'intervalle de confiance
Conifères	42,60	1,69	40,91	44,30
Prairie permanente	34,09	1,69	32,40	35,78
Culture	5,49	0,55	4,94	6,03
Feuillus	5,03	0,95	4,08	5,99
Prairie temporaire	3,92	0,36	3,56	4,29
Zone artificielle	3,32	0,26	3,06	3,58
Haie	2,44	0,41	2,03	2,84
Forêt indéterminée	1,14	0,12	1,02	1,26
Lande ligneuse	1,09	0,13	0,96	1,22
Milieu aquatique	0,88	0,30	0,58	1,17

Le **relief** est globalement très prononcé avec une pente moyenne de près de 17 % et certains secteurs peuvent être particulièrement pentus (maximum 214 %) (Figure 99).

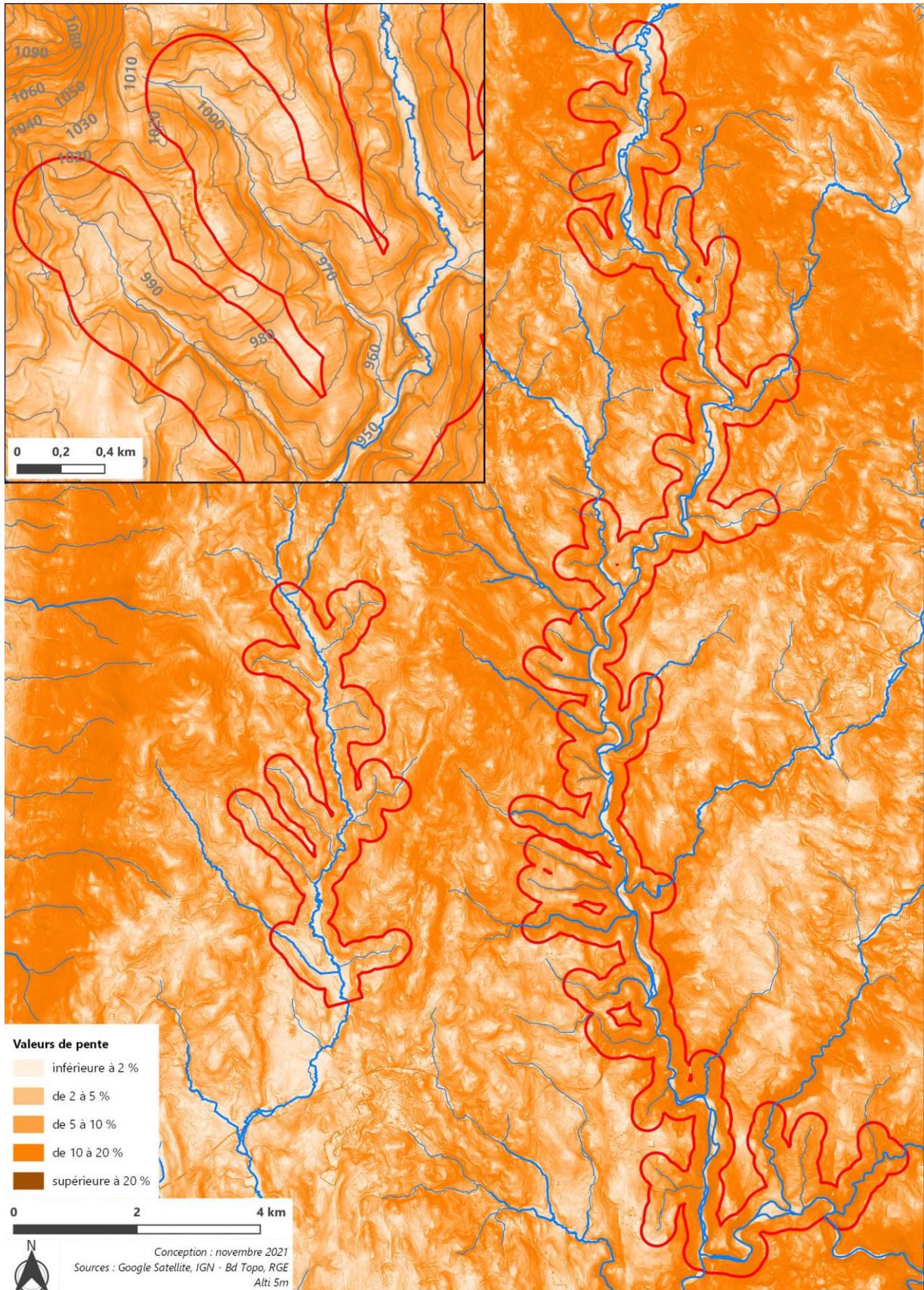


Figure 99 : Cartographie des pentes sur la zone d'étude

➤ *A l'échelle des bandes tampons*

A l'échelle des bandes tampons, les variables présentées ci-dessous sont celles portant sur une plus grande surface et / ou ayant un effet significatif (cf. ci-dessous), à savoir : les forêts de conifères, les prairies, la pente maximale et les zones artificielles. Les graphiques des variables supplémentaires et les valeurs de toutes les variables sont présentés en annexe 6.

Forêts de conifères

Les conifères sont présents en abondance sur l'ensemble des bandes tampons (entre 36 et 47 % de la surface). On observe que leurs proportions sont plus variables aux abords de la rivière qu'à distance de celle-ci (Figure 100).

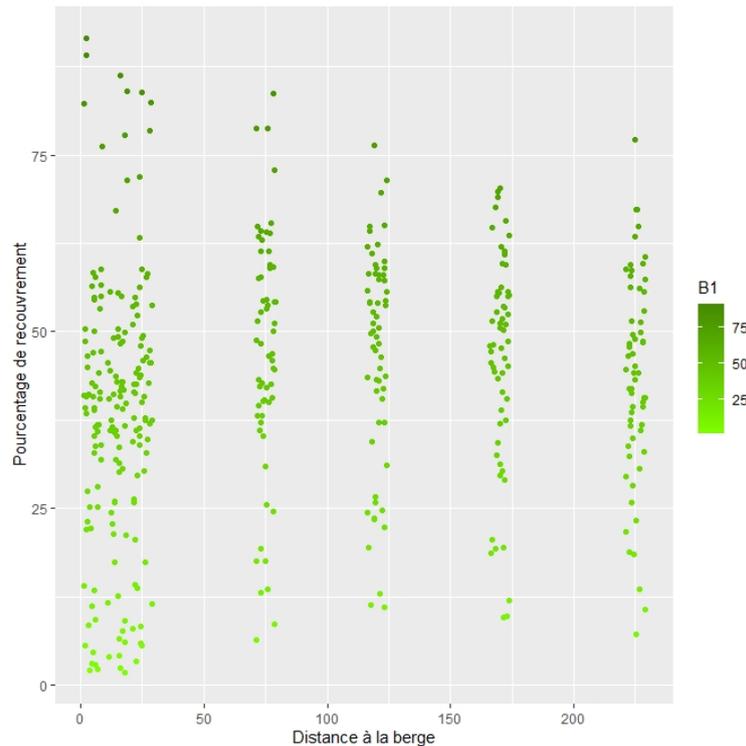


Figure 100 : Pourcentage de surface recouverte par des forêts de conifères suivant la distance à la berge

Les prairies permanentes

Les prairies permanentes (de fauche et/ou pâturées) ont été maintenues dissociées des prairies temporaires du fait que ces dernières par définition peuvent être mises en cultures. Les prairies permanentes occupent entre 27 et 45 % de la surface des bassins versants. La variabilité de cette proportion régresse avec la distance à la berge (Figure 101). Le mode d'exploitation des prairies (fauche et/ou pâture) possède probablement un impact différencié sur la rivière. Toutefois, n'ayant pas d'informations sur le sujet, il n'a pas été possible d'intégrer cette variable.

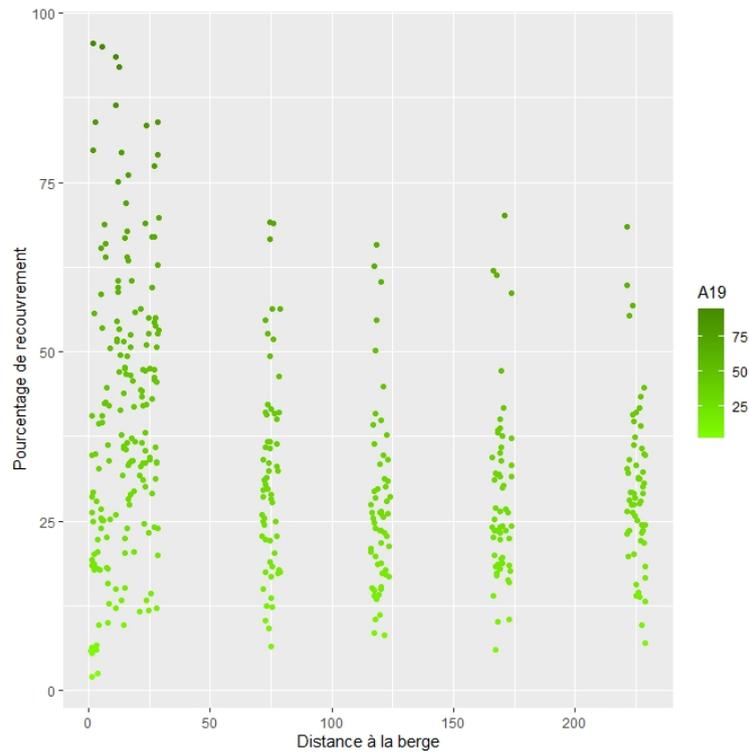


Figure 101 : Pourcentage de surface recouverte par des prairies permanentes suivant la distance à la berge

Les zones artificielles

Les zones artificielles regroupent les routes, les maisons... Elles occupent des surfaces relativement stables entre 1,6 % et 4,5% selon l'éloignement à la berge. On constate toutefois une légère progression en fonction de l'éloignement à la berge (Figure 102).

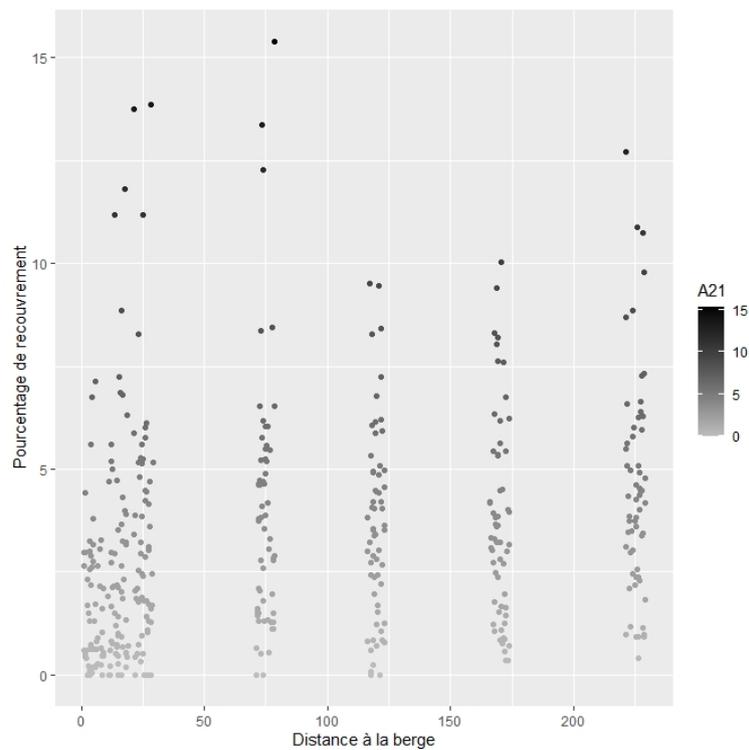


Figure 102 : Pourcentage de surface recouverte par des surfaces artificielles suivant la distance à la berge

Les pentes maximales

La pente maximale est modérée aux abords de la rivière (moyenne de 84,70 % sur la bande 0 à 10 m) puis elle augmente jusqu'à atteindre en moyenne 111,73 % (sur la bande 20 à 50 m) avant de redescendre à 83,40 % (sur la bande de 200 à 250 m). Cette situation reflète un fond de vallée plutôt plat et avec des coteaux marqués entre 10 et 50 m de la berge qui est illustrée par le profil en long des pentes maximales cumulées (Figure 104). En outre, il y a une grande hétérogénéité aux abords de la rivière avec des zones de gorges encaissées et des vallées plus larges (Figure 103). De même, le relief est nettement moins marqué sur l'Arzon que sur l'Ance.

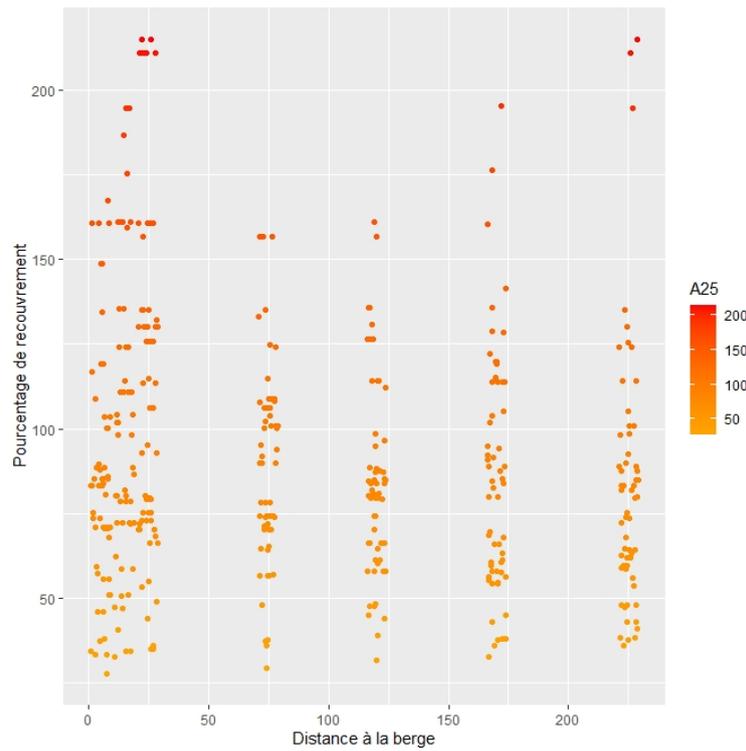


Figure 103 : Pentas maximales (en %) suivant la distance à la berge

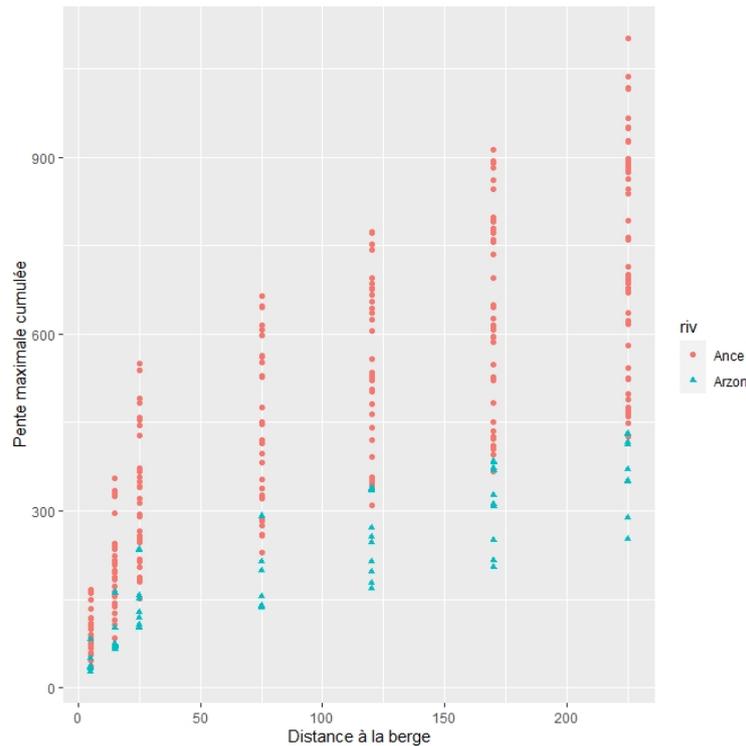


Figure 104 : Profil des pentes maximales cumulées en fonction des rivières (« riv »)

6.2.2. La présence / absence de la moulette perlière

La première étape concerne les hypothèses émises au regard du **potentiel apport de sédiments fins**. En effet, plusieurs hypothèses ont été émises sur le fait que des surfaces puissent fournir des sédiments fins néfastes à la moulette par le colmatage qu'ils procurent (Geist et Auerswald, 2007). Il s'agit des forêts de conifères, en prairies (permanentes et temporaires) et des cultures. A l'inverse des surfaces sont supposées être moins pourvoyeuses de sédiments fins, donc, plus favorables. Ce sont celles en forêts de feuillus. Enfin et par contraste aux cultures qui pourraient être sur les pentes maximales, les feuillus sur ces mêmes pentes doivent être nettement moins pourvoyeuses (Tableau 26).

L'analyse des modèles additifs testés à l'échelle de chaque bande tampon et sur l'entièreté de ces bandes repose sur le Tableau 36. Il ressort que sur la **bande 0 à 10 m** et donc la plus proche de la rivière, l'hypothèse selon laquelle les surfaces ouvertes (prairies, cultures) et plutôt anthropisés (conifères) seraient néfastes à la moulette ne tient pas complètement. Les résultats illustrent une situation plus complexe où les prairies auraient un effet positif sur les pentes supérieure à 54,5 %. En outre, l'effet conjugué des prairies et des pentes maximales explique près de 25 % la présence de la moulette. De même, les conifères et la pente ont un effet net sur les mulettes. Quand la pente est inférieure à 83 %, l'effet est positif et négatif au-delà. Ces variables en effet conjugué expliquent près de 31 % la présence des mulettes. Enfin, les feuillus possèdent un effet évident mais le point de bascule se situe à une pente très faible puisque la présence de ces arbres est positivement corrélée à celle de la moulette pour une pente inférieure à 0,112 % et inversement. Cette variable explique 23 % la présence de la moulette. L'effet des autres occupations du sol n'est pas évident. On peut donc conclure à une absence d'effet pour ces autres surfaces. Par contre, la pente minimale qui était pressentie comme étant favorable à l'espèce l'est effectivement. Sa contribution à la présence est même relativement élevée puisqu'elle explique 10 % de la présence de la moulette et avec un coefficient directeur proportionnellement élevé (18,56).

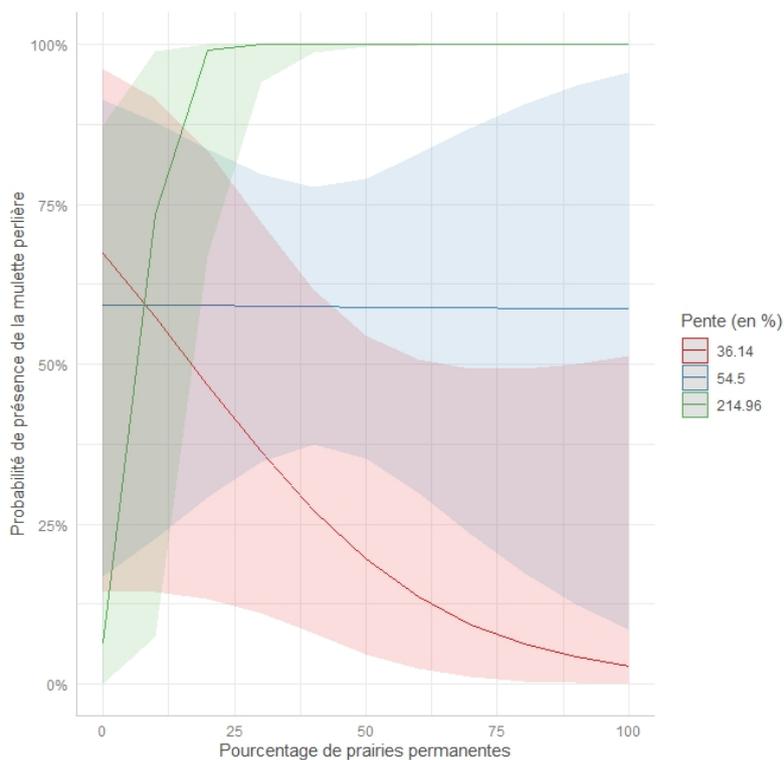


Figure 105 : Effet des prairies permanentes sur la présence de la muette perlière en fonction de la pente sur la bande 0 à 10 m

Sur la **bande de 10 à 20 m**, tant les conifères que les prairies permanentes, que les prairies temporaires, les feuillus et que dans une moindre mesure les cultures en interaction avec les pentes maximales possèdent des effets évidents avec un pourcentage de variance expliquée respectivement de 23, 17, 32, 13 et 20 %). Ainsi, les conifères possèdent un effet positif sur les pentes modérées (inférieures à 91 %) à l'inverse des prairies permanentes qui ont un effet négatif sur pente faible. En outre, les prairies temporaires et les cultures possèdent un effet positif quelle que soit la pente. L'effet des prairies temporaires (et dans une moindre mesure les cultures) revêt un intervalle de confiance proportionnellement important comparé aux autres variables révélant une disparité des effets de ces variables. Les feuillus possèdent eux aussi un effet évident sur les pentes minimales (il ne l'est pas sur les pentes maximales). Toutefois, cet effet est moindre que celui des autres variables aux effets évidents puisqu'elle ne contribue qu'à hauteur de 13 %. Cette situation illustre donc le fait que l'hypothèse selon laquelle ces surfaces ouvertes seraient néfastes ne tient pas. Par ailleurs, il n'est pas noté d'effet particulier de la pente minimale sur les mulettes pour cette bande tampon contrairement à celle plus proche de la rivière. De même, les forêts n'apportent pas d'éléments de réponses quant à la présence de la muette.

Sur la **bande 20 à 50 m** les effets de l'occupation du sol sont moins évidents. Seule la pente maximale possède un effet évident mais de faible ampleur. Par ailleurs, les prairies temporaires possèdent un effet faiblement positif (coefficient directeur faible) évident ($p = 0,054$) et quelle que soit la pente.

La bande **50 à 100 m** fait ressortir les conifères et les prairies permanentes comme ayant un effet évident soit positif, soit négatif suivant la pente maximale à l'instar de la bande tampon 10-20 m. En outre, cette bande explique à hauteur de l'ordre de 30 % la présence - absence de la muette pour ces deux modèles. De même, la prairie temporaire possède un effet positif évident quelle que soit la

pende maximale. Enfin, les feuillus possède un effet évident positif par pente inférieur à 0,139 et négatif par pente plus forte.

De même, la bande **100 à 140 m** possède un effet évident par l'intermédiaire des conifères qui, là encore sont corrélés à la diminution de la probabilité de présence de la muette perlière par pente forte et inversement sur pente modérée (inférieure à 105 %). Toutefois, ce modèle explique à hauteur de 14 % la présence de l'espèce soit deux fois moins que le même modèle sur la pente 50 à 100 m.

Sur la bande 140 à 200 m les conifères possèdent un effet similaire à la précédente avec un point de bascule pour une pente de 97% et explique 11 % de la présence de l'espèce.

Enfin, la bande **200 à 250 m** révèle un effet évident des conifères positif ou négatif suivant la pente (à l'instar des bandes précédentes). Il en est de même avec les prairies permanentes qui possèdent un effet inverse des conifères comme sur les bandes tampons 10-20 et 50-100 m. Mais le pourcentage de variance expliqué pour ces deux variables se situe vers 11 %.

A l'échelle du bassin versant (de 0 à 250 m), aucune variable ne possède d'effet évident.

L'analyse du point de bascule (entre effet positif et négatif) de la pente avec conifères fait ressortir les valeurs suivantes (Tableau 31). Ainsi, en deçà de ces pentes, l'effet des conifères est positif, au-delà, il est négatif. Il en est de même avec les prairies permanentes (Tableau 32) et les prairies temporaires (Tableau 33).

Tableau 31 : Points de bascule de la pente maximale sur la contribution des forêts de conifères sur la présence de la muette perlière (effet positif en deçà, négatif au-delà)

Bande tampon	0 à 10 m	10 à 20 m	50 à 100 m	100 à 140 m	140 à 200 m	200 à 250 m
Point de bascule de la pente (effet positif en deçà, négatif au-delà)	83 %	91 %	112 %	105 %	97 %	66,5%
A partir d'une pente de...	36,14 %	36,14 %	59,14 %	55,63 %	50,07 %	45,10 %

Tableau 32 : Points de bascule de la pente maximale sur la contribution des prairies permanentes sur la présence de la muette perlière (effet négatif en deçà, positif au-delà)

Bande tampon	0 à 10 m	10 à 20 m	50 à 100 m	200 à 250 m
Point de bascule de la pente (effet positif en deçà, négatif au-delà)	54,5 %	70,0 %	117,0 %	75,5 %
A partir d'une pente de...	50,91 %	59,89 %	59,14 %	45,10

Tableau 33 : Points de bascule de la pente minimale sur la contribution des forêts de feuillus sur la présence de la muette perlière (effet positif en deçà, négatif au-delà)

Bande tampon	0 à 10 m	50 à 100 m
Point de bascule de la pente (effet positif en deçà, négatif au-delà)	0,112	0,139 %
En deçà d'une pente de...	0,14 %	0,16 %

L'effet des autres variables est notoirement plus secondaire. Cependant, la fermeture du milieu révèle un effet très nettement négatif sur des pentes fortes de 0 à 20 m de la rivière (Tableau 36 à Tableau 38). On notera toutefois que pour la bande de 0 à 10 m, la fermeture du milieu sur une pente modérée (de 68%) permet une probabilité de présence de la moulette perlière de plus de 70 %. Cette situation est à l'inverse de la bande tampon de 10 à 20 m où la probabilité de présence reste faible au point d'infléchissement de la pente (31 %). L'analyse du travail du sol révèle des disparités entre les bandes 0 à 10 m et de 10 à 20 m.

Tableau 34 : Points de bascule de la pente sur la contribution des milieux fermés sur la présence de la moulette perlière

Bande tampon	0 à 10 m	10 à 20 m
Point de bascule de la pente (effet positif en deçà, négatif au-delà)	68 %	31 %

Les hypothèses émises concernant l'apport de sédiments fins par des cultures, prairies et conifères semblent être vérifiées partiellement avec les conifères (Tableau 35). En effet, les prairies et les conifères sur pentes faibles à modérées sont favorables à la moulette. Mais, les pentes fortes avec conifères sont néfastes. Les feuillus supposés favorables ne possèdent pas d'effets nets quelle que soit la pente.

Tableau 35 : Synthèse des conclusions hypothèse par hypothèse

Référence du modèles	Détail du modèle	Hypothèse / commentaire	Effets évidents observés	Vérification des hypothèse
P_{maxi}	Pente maximale	Surface supposée fournisseuse en sédiments notamment fins donc moins favorable à la moulette perlière (cf. colmatage)	Effet positif jusqu'à 50 m	Hypothèse invalidée
P_{maxi} $\times S_{CON}$	Pente maximale x proportion de surface en forêts de conifères		Effet positif par pente modérée Effet négatif par pente forte Jusqu'à 250 m	Hypothèse validée
P_{maxi} $\times S_{PP}$	Pente maximale x proportion de surface en prairie permanente		Effet négatif par pente modérée Effet positif par pente forte Jusqu'à 100 m	Hypothèse invalidée
P_{maxi} $\times S_{PT}$	Pente maximale x proportion de surface en prairie temporaire		Effet positif quelle que soit la pente	Hypothèse invalidée
P_{maxi} $\times S_{CULT}$	Pente maximale x proportion de surface en cultures		Aucun effet évident	Hypothèse invalidée
P_{mini}	Pente minimale		Surface supposée comme étant peu pourvoyeuse de sédiments fins donc plus favorable à la moulette perlière (moins de colmatage)	Effet positif de 0 à 10 m et de 200 à 250 m
S_{FEU}	Proportion de surface en feuillus	Aucun effet évident		Hypothèse invalidée
P_{mini} $\times S_{FEU}$	Pente minimale x Proportion de surface en feuillus	Effet positif par pente très faible Effet négatif par pente faible Sur les bandes 0 à 10 m et 50 à 100 m Effet positif sur les pentes faibles de 10 à 20 m		Hypothèse invalidée
P_{max} $\times S_{FEU}$	Pente maximale x proportion de surface en feuillus	Par contraste supposé à $P_{maxi} + S_{CULT}$		Aucun effet évident

Etude des populations de moule perlière sur le site Natura 2000 FR8302040
« Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon »

Tableau 36 : Caractéristiques des modèles linéaires généralisés (en interaction) testés pour apprécier l'effet des milieux ouverts et anthropisés suivant les pentes comme potentiellement impactant la moule perlière en fournissant ou pas des sédiments fins

		0 à 10 m			10 à 20 m			20 à 50 m			50 à 100 m			100 à 140 m			140 à 200 m			200 à 250 m			0 à 250 m			
		Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	
P _{max}	Ordonnée à l'origine	-0,980	0,851		0,766	0,748		-0,719	0,736		0,930	0,840		0,646	0,872		0,124	0,744		-0,360	0,779		-0,269	0,797		0,736
	Coefficient directeur	0,022	0,011	0,038	0,015	0,007	0,036	0,014	0,007	0,039	-0,002	0,001	0,838	0,001	0,010	0,882	0,008	0,008	0,360	0,014	0,010	0,138	-0,001	0,008	0,856	0,856
	AIC	73,643			73,761			73,830			78,878			78,898			78,039			76,205			84,728			
	Pourcentage de variance expliquée	7,04			6,89			6,79			2,72			0,03			1,18			3,62			0,04			
P _{max}	Ordonnée à l'origine	-7,794	2,428	0,001	-5,347	1,914	0,005	-0,231	0,927	0,803	-9,704	3,438	0,005	-7,051	3,266	0,031	-5,583	2,679	0,037	-6,026	2,963	0,042	-4,259	2,504	0,089	0,089
	Coefficient directeur	0,112	0,031	0,000	0,072	0,022	0,001	0,008	0,010	0,407	0,100	0,037	0,008	0,074	0,035	0,035	0,067	0,032	0,033	0,101	0,045	0,026	0,039	0,026	0,125	
	S _{CON}	Coefficient directeur	0,192	0,061	0,002	0,138	0,053	0,009	-0,108	0,223	0,629	0,253	0,073	0,001	0,187	0,071	0,008	0,134	0,057	0,019	0,122	0,058	0,037	10,262	5,841	0,079
P _{max} *S _{CON}	Coefficient directeur	-0,002	0,001	0,001	-0,002	0,001	0,003	0,001	0,002	0,525	-0,002	0,001	0,001	-0,002	0,001	0,016	-0,001	0,001	0,029	-0,002	0,001	0,033	-0,103	0,058	0,077	
	AIC	59,886			65,591			77,023			60,814			72,47			74,508			74,43			84,862			
	Pourcentage de variance expliquée	30,74			23,13			7,87			29,51			13,95			11,23			11,33			4,82			
P _{max}	Ordonnée à l'origine	1,421	1,855	0,444	1,925	2,500	0,441	3,452	2,408	0,152	10,607	3,165	0,001	5,131	2,291	0,025	6,143	2,668	0,021	4,722	2,420	0,051	4,443	2,876	0,122	
	Coefficient directeur	-0,019	0,018	0,298	-0,019	0,017	0,267	-0,019	0,018	0,293	-0,080	0,026	0,002	-0,035	0,023	0,125	-0,050	0,028	0,077	-0,050	0,030	0,100	-0,046	0,027	0,090	
	S _{PP}	Coefficient directeur	-0,127	0,049	0,011	-0,079	0,041	0,055	-0,081	0,044	0,069	-0,259	0,086	0,003	-0,132	0,073	0,072	-0,181	0,082	0,028	-0,172	0,080	0,032	12,429	7,428	0,094
P _{max} *S _{PP}	Coefficient directeur	0,002	0,001	0,003	0,001	0,000	0,011	0,001	0,000	0,095	0,002	0,001	0,009	0,001	0,001	0,215	0,002	0,001	0,064	0,002	0,001	0,042	0,124	0,077	0,109	
	AIC	64,28			70,173			74,175			66,893			76,716			74,037			74,412			98,028			
	Pourcentage de variance expliquée	24,88			17,01			11,67			31,39			8,28			11,86			11,36			4,62			
P _{max}	Ordonnée à l'origine	-1,226	0,995	0,218	-2,125	1,086	0,050	-0,944	1,349	0,484	2,476	1,590	0,119	0,080	1,778	0,964	1,314	1,691	0,437	0,275	1,474	0,852	-0,917	1,962	0,640	
	Coefficient directeur	0,021	0,011	0,069	0,019	0,009	0,033	0,007	0,011	0,516	-0,027	0,015	0,076	0,002	0,020	0,920	-0,013	0,019	0,490	-0,001	0,019	0,940	-0,000	0,019	0,983	
	S _{PT}	Coefficient directeur	-6,846	8,355	0,413	-3,118	1,937	0,107	-0,350	0,358	0,328	-0,444	0,215	0,039	0,046	0,235	0,846	-0,237	0,281	0,399	-0,117	0,225	0,602	8,675	32,418	0,789
P _{max} *S _{PT}	Coefficient directeur	0,190	0,174	0,275	0,090	0,041	0,029	0,010	0,005	0,054	0,008	0,003	0,009	0,000	0,003	0,866	0,004	0,003	0,232	0,003	0,003	0,384	0,024	0,349	0,945	
	AIC	69,785			58,99			69,319			74,192			81,885			79,798			78,583			87,904			
	Pourcentage de variance expliquée	17,53			31,94			18,15			11,65			1,38			4,17			5,79			1,06			
P _{max}	Ordonnée à l'origine	-1,839	0,982	0,061	-1,164	0,829	0,160	-0,682	1,012	0,500	3,069	1,615	0,057	3,749	2,181	0,086	0,133	1,628	0,935	0,004	1,729	0,998	-0,482	1,657	0,771	
	Coefficient directeur	0,026	0,011	0,025	0,013	0,007	0,082	0,013	0,009	0,177	-0,025	0,016	0,115	-0,033	0,026	0,202	-0,001	0,019	0,967	-0,002	0,024	0,946	0,002	0,018	0,915	
	S _{CULT}	Coefficient directeur	-1024	108400	0,993	-1,693	1,017	0,096	-0,020	0,255	0,936	-0,352	0,214	0,101	-0,340	0,216	0,115	-0,012	0,154	0,940	-0,029	0,161	0,855	3,072	21,020	0,884
P _{max} *S _{CULT}	Coefficient directeur	30,71	3249	0,993	0,050	0,026	0,054	0,001	0,003	0,785	0,004	0,002	0,075	0,004	0,003	0,147	0,001	0,002	0,695	0,001	0,002	0,528	-0,048	0,228	0,833	
	AIC	62,946			67,721			77,648			79,262			79,948			80,15			78,286			88,662			
	Pourcentage de variance expliquée	26,66			20,29			7,04			4,88			3,97			3,70			6,19			0,12			
P _{min}	Ordonnée à l'origine	-0,766	0,643		0,068	0,646		0,623	0,530		-0,022	0,583		0,219	0,486		0,197	0,455		-0,185	0,500		-1,545	0,779		
	Coefficient directeur	18,558	7,649	0,015	7,347	6,371	0,849	2,782	8,677	0,748	8,589	5,856	0,142	3,934	3,081	0,202	4,034	2,763	0,144	7,558	3,623	0,037	10,050	6,403	0,117	
	AIC	71,117			77,336			78,817			76,405			76,833			76,355			73,516			82,145			
	Pourcentage de variance expliquée	10,42			2,11			0,14			3,36			2,76			3,42			7,21			3,24			
S _{FEU}	Ordonnée à l'origine	0,613	0,331		0,538	0,323		0,437	0,328		0,480	0,323		0,737	0,310		0,514	0,316		0,562	0,314	0,073	-0,511	0,317		
	Coefficient directeur	0,015	0,018	0,421	0,034	0,028	0,224	0,088	0,056	0,117	0,105	0,072	0,147	0,009	0,038	0,819	0,146	0,103	0,157	0,150	0,125	0,232	3,001	4,895	0,540	
	AIC	78,217			77,119			75,586			76,019			78,866			76,347			77,111			84,385			
	Pourcentage de variance expliquée	0,94			2,4			4,45			3,87			0,07			3,43			2,41			0,47			

Etude des populations de moulette perlière sur le site Natura 2000 FR8302040
« Rivières à Moules perlières du bassin de l'Ance du nord et de l'Arzon »

		0 à 10 m			10 à 20 m			20 à 50 m			50 à 100 m			100 à 140 m			140 à 200 m			200 à 250 m			0 à 250 m		
		Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p	Valeur	IC	p
	Ordonnée à l'origine	-1,859	0,833	0,026	-1,451	0,935	0,121	0,576	0,592	0,331	-0,987	0,733	0,178	0,265	0,567	0,640	0,029	0,519	0,956	-0,811	0,560	0,174	-1,841	1,043	0,078
P_{mini}	Coefficient directeur	30,918	11,223	0,006	21,393	10,333	0,038	-2,824	10,208	0,782	17,015	7,907	0,031	3,714	3,935	0,345	3,867	3,383	0,253	12,127	4,935	0,014	13,100	9,334	0,160
S_{FEU}	Coefficient directeur	0,192	0,079	0,015	0,156	0,067	0,019	0,042	0,121	0,730	0,377	0,163	0,021	-0,015	0,080	0,849	0,159	0,156	0,310	0,688	0,394	0,080	3,850	15,666	0,807
P_{mini}^*	Coefficient directeur	-1,719	0,652	0,008	-0,834	0,323	0,010	0,792	1,875	0,673	-2,715	1,327	0,039	0,060	0,439	0,891	-0,228	0,568	0,689	-3,786	2,103	0,072	-	97,467	0,712
S_{FEU}	Coefficient directeur	-1,719	0,652	0,008	-0,834	0,323	0,010	0,792	1,875	0,673	-2,715	1,327	0,039	0,060	0,439	0,891	-0,228	0,568	0,689	-3,786	2,103	0,072	-	97,467	0,712
	AIC	65,593			73,033			79,401			74,028			80,792			78,845			72,068			85,937		
	Pourcentage de variance expliquée	23,13			13,20			4,70			11,87			2,84			5,44			14,48			3,50		
	Ordonnée à l'origine	-1,076	1,005	0,284	-0,583	0,866	0,501	-0,231	0,927	0,803	1,444	0,895	0,107	0,182	0,906	0,841	0,609	0,914	0,505	-0,341	0,897	0,704	-0,391	0,950	0,681
P_{max}	Coefficient directeur	0,023	0,013	0,081	0,013	0,009	0,148	0,008	0,010	0,407	-0,011	0,010	0,254	0,006	0,011	0,580	-0,001	0,012	0,910	0,013	0,012	0,289	-0,003	0,011	0,813
S_{FEU}	Coefficient directeur	0,010	0,064	0,876	-0,030	0,111	0,785	-0,108	0,223	0,629	-0,762	0,595	0,200	0,466	0,312	0,135	0,008	0,444	0,986	0,144	0,321	0,654	39,009	34,604	0,260
	Coefficient directeur	-0,000	0,001	0,859	0,000	0,001	0,730	0,001	0,002	0,525	0,009	0,006	0,153	-0,004	0,003	0,128	0,001	0,004	0,756	-0,001	0,003	0,844	-0,274	0,275	0,320
	AIC	77,611			77,59			77,023			76,875			79,442			80,240			79,661			86,691		
	Pourcentage de variance expliquée	7,09			7,11			7,87			8,07			4,64			3,58			4,35			2,23		

*IC= Intervalle de confiance – p= probabilité

Tableau 37 : Contribution des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative) sur la probabilité de présence de la mulette perlière

Variables	x Pentas	0-10	10-20	20-50	50-100	100-140	140-200	200-250	0-250
Pente maximale		↗	↗	↗	↔	↔	↔	↔	↔
Forêts de conifères	Modérée	↗	↗	↔	↗	↗	↗	↗	↔
	Forte	↘	↘	↔	↘	↘	↘	↘	↔
Prairies Permanentes	Modérée	↘	↘	↔	↘	↔	↔	↘	↔
	Forte	↗	↗	↔	↗	↔	↔	↗	↔
Prairies temporaires	Modérée	↔	↗	↗	↗	↔	↔	↔	↗
	Forte	↔	↗	↗	↗	↔	↔	↔	↔
Cultures	Modérée	⊗	↗	↔	↔	↔	↔	↔	↔
	Forte	⊗	↗	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Pente minimale		↗	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Feuillus		↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Forêts de feuillus	Faible	↗	↗	↔	↗	↔	↔	↔	↔
	Modérée	↘	↗	↔	↘	↔	↔	↔	↔
	Forte	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔

↔↔ : contribution positive ou négative non significative ; ↗↘ : contribution positive ou négative significative (la taille est suivant le pourcentage de variance expliquée) ; ↔ : effet neutre ; ⊗ : interprétation impossible

Tableau 38 : Contribution de la fermeture du milieu et du travail du sol sur la moule perlière suivant des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative)

Variables	x Pentas	0-250	0-10	10-20	20-50	50-100	100-140	140-200	200-250
Fermeture du milieu	Modérée	↗	↗	↘	↗	↗	↗	↗	⊗
	Forte	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	⊗
+ Travail du sol	Modérée	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↗	⊗
	Forte	↘	↗	↘	↘	↘	↗	↗	⊗

↗↘ : contribution positive ou négative non significative ; ↗↘ : contribution positive ou négative significative (la taille est suivant le pourcentage de variance expliquée) ; ⇔ : effet neutre ; ⊗ : interprétation impossible – La taille est suivant le pourcentage de variance expliquée

A partir de ces données issues des différentes bandes tampons (Tableau 36 et Tableau 39), il est possible de produire des cartes avec les zones favorables et inversement défavorables à la moulette perlière.

Tableau 39 : Base de la carte inférentielle

Bande tampon	Occupation du sol	Pour une pente...	Point de bascule	En deçà	Au-delà
0 à 10 m	Forêt de conifères	> 36,14 %	83 %	Effet positif	Effet négatif
	Prairie permanente	> 50,91 %	54,5 %	Effet négatif	Effet positif
10 à 20 m	Forêt de feuillus	< 0,14 %	0,112 %	Effet positif	Effet négatif
	Forêt de conifères	> 36,14 %	91 %	Effet positif	Effet négatif
	Prairie permanente	> 59,89 %	70 %	Effet négatif	Effet positif
	Prairie temporaire	> 36,14 %	-	Effet positif	Effet positif
20 à 50 m	Forêt de feuillus	< 0,15 %	0,139 %	Effet positif	Effet négatif
	Prairie temporaire	> 61,73 %	-	Effet positif	Effet positif
50 à 100 m	Forêt de conifères	> 59,14 %	112 %	Effet positif	Effet négatif
	Prairie permanente	> 59,14 %	117 %	Effet négatif	Effet positif
	Prairie temporaire	> 59,14 %	-	Effet positif	Effet positif
	Forêt de feuillus	< 0,16 %	0,139%	Effet positif	Effet négatif
100 à 140 m	Forêt de conifères	> 55,63 %	105 %	Effet positif	Effet négatif
140 à 200 m	Forêt de conifères	> 50,07 %	97 %	Effet positif	Effet négatif
200 à 250 m	Forêt de conifères	> 45,10 %	66,5 %	Effet positif	Effet négatif
	Prairies permanentes	> 45,10 %	75,5 %	Effet négatif	Effet positif

La seconde hypothèse portait sur **l'effet de la ripisylve** sur la moulette perlière via le contingentement de la rivière et de l'accentuation de l'instabilité sédimentaire en découlant. Il ressort des résultats (Tableau 40) que quel que soit la nature des berges (bande tampon de 0 à 10 m), la pente minimale est la variable avec une contribution la plus parcimonieuse (AIC inférieur de 3,8 points). Ainsi, l'effet des conifères, des feuillus et des haies reste secondaire. La modèle concernant la ripisylve le plus parcimonieux inclus la surface forestière de feuillus, de conifères, de forêts indéterminées, la pente de la rivière et l'axe 2 de l'ACP. Il semble toutefois se dessiner un effet négatif des feuillus et des conifères avec un coefficient directeur de près de 3,5 fois plus fort pour ce dernier. Les forêts indéterminées semblent avoir un effet nettement positif comparé aux conifères et feuillus. De même, la pente de la rivière contribue positivement à la présence de la moulette.

Suivant les effets conjugués de la pente de la rivière avec la ripisylve (sous quelque forme que ce soit), il n'y a aucun effet significatif qui se dessine (Tableau 41).

Tableau 40 : Caractéristiques des modèles linéaires généralisés testés pour apprécier l'effet de la ripisylve comme potentiellement impactant la muette perlière en contingentant la rivière et en augmentant l'instabilité sédimentaire

0 à 10 m				
		Valeur	IC	p
	Ordonnée à l'origine	-0,442	0,970	0649
S_{HAIE}	Coefficient directeur	-0,038	0,035	0,276
P_{riv}	Coefficient directeur	2,844	1,718	0,098
	AIC	77,039		
	Pourcentage de variance expliquée	5,18		
	Ordonnée à l'origine	-0,786	1,056	0,457
S_{FEUIL}	Coefficient directeur	-0,001	0,023	0,821
P_{riv}	Coefficient directeur	2,943	2,142	0,169
	AIC	78,188		
	Pourcentage de variance expliquée	3,65		
	Ordonnée à l'origine	-1,250	1,121	0,265
S_{CON}	Coefficient directeur	0,014	0,015	0,347
P_{riv}	Coefficient directeur	2,737	1,668	0,101
	AIC	77,317		
	Pourcentage de variance expliquée	4,81		
	Ordonnée à l'origine	3,403	2,070	0,100
S_{FEU}	Coefficient directeur	-0,053	0,036	0,143
S_{CON}	Coefficient directeur	-0,184	0,080	0,021
S_{FIND}	Coefficient directeur	0,963	0,469	0,040
P_{riv}	Coefficient directeur	6,631	3,054	0,030
Axe2	Coefficient directeur	5,086	2,018	0,012
	AIC	74,972		
	Pourcentage de variance expliquée	15,95		

Tableau 41 : Contribution de la ripisylve sur la présence de la muette perlière suivant des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative)

Variables	X Pentes rivière	0-10 m
Haies	Faible	↘
	Forte	↘
Forêts de feuillus	Faible	↗
	Forte	↘
Forêts de conifères	Faible	↗
	Forte	↘
Strate arborée	Faible	↗
	Forte	↘

↗↘ : contribution positive ou négative non significative

L'analyse de composante principale discriminante sur la présence / absence de la muette à partir de l'occupation des sols fait ressortir les bandes tampons 50 à 100 m, 100 à 150 m et 150 à 200 m avec une évidence forte à modéré de leur effet (probabilité p comprise entre 0,010 à 0,023) (Tableau 42).

Tableau 42 : Probabilité de la discrimination par l'analyse de composantes principales sur la présence absence de la mulette perlière par bande tampon

Bande tampon	0 à 10 m	10 à 20 m	20 à 50 m	50 à 100 m	100 à 140 m	140 à 200 m	200 à 250 m	0 à 250 m
Probabilité	0,337	0,222	0,220	0,010	0,023	0,022	0,110	0,888

6.2.3. L'occupation du sol prise isolément

Sur chacune des bandes tampon, les effets des occupations du sol sont variables d'une bande tampon à l'autre. Seuls les résultats avec un effet modéré à très fort sont présentés.

➤ Bande tampon de 0 à 250 m

Il n'existe pas d'effet net identifiable à partir de l'analyse de composante principale entre la présence et absence de mulette ($p = 0,888$) (Figure 106).

Il n'existe pas d'évidence forte d'un effet des conifères sur l'ensemble des bandes tampon (0 à 250 m). Toutefois, le meilleur modèle (ex aequo avec la pente minimale) est la forêt de conifères de façon quadratique (du type $y=ax^2+bx+c$). L'effet n'est cependant pas évident ($p = 0,080$ à $0,083$) (Tableau 43). Le pourcentage de variance expliquée reste faible (4,92 %) sur l'ensemble des bandes tampon. Enfin, graphiquement on constate que l'intervalle de confiance est conséquent sur l'ensemble des valeurs des conifères mais surtout sur des valeurs faibles et élevées (Figure 108). L'optimum se situe vers 45 % de la surface en conifères.

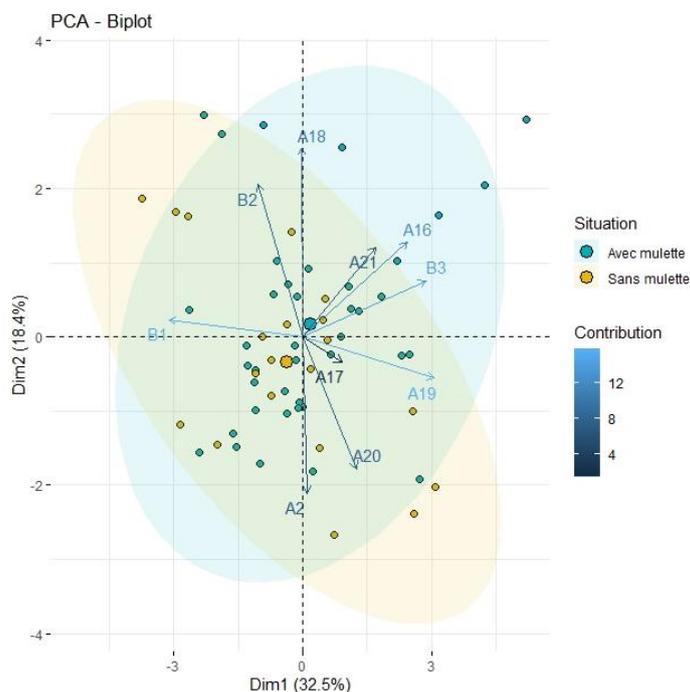


Figure 106 : Représentation graphique des nuages de points en fonction de la présence ou non de la mulette perlière par l'Analyse de Composantes Principales sur la bande tampon de 0 à 250 m

Tableau 43 : Caractéristiques des modèles linéaires généralisés quadratiques des conifères sur la présence / absence de la moulette perlière et sur la bande de 0 à 250 m

	Valeurs	IC	P
Ordonnée à l'origine	-3,728	2,079	0,073
Conifères	18,262	10,437	0,080
Conifères²	-22,138	12,752	0,083
AIC	82,791		
Pourcentage de variance expliquée	4,92		

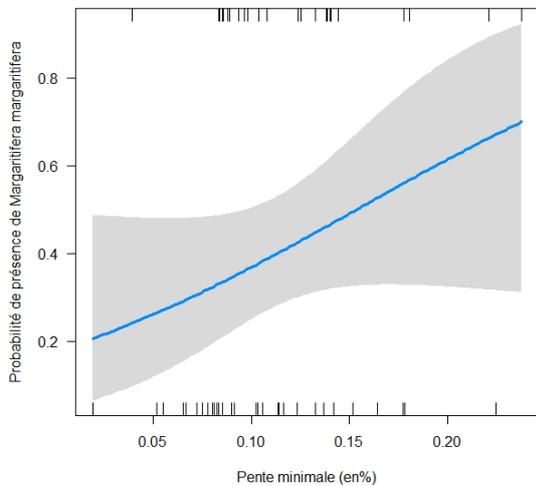


Figure 107 : Probabilité de présence de la moulette perlière en fonction de la pente minimale sur la bande de 0 à 250 m

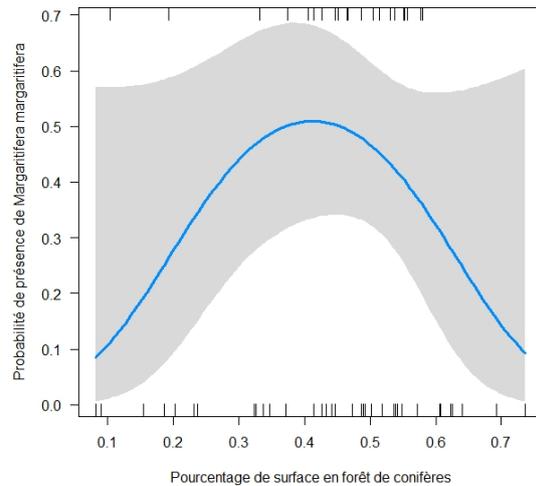


Figure 108 : Probabilité de présence de la moulette perlière en fonction de la surface en conifères sur la bande de 0 à 250 m (GLM quadratique)

6.2.4. Suivant les situations : régression, maintien ou absence par comparaison entre les données de Cochet de 1998 à 2003 et VRIGNAUD (2018)

La première approche a consisté à comparer les trois situations (régression, maintien et absence) au regard de critères de l'occupation des sols, de la pente maximale et de la pente minimale.

La seconde approche consiste à modéliser le risque d'extinction en fonction des hypothèses émises dans la partie 0. Cette modélisation repose sur des modèles linéaires généralisés en interaction.

➤ Régression, maintien ou absence sur la bande tampon de 0 à 250 m

La comparaison de l'occupation du sol portant sur l'ensemble du bassin versant (bandes tampon de 0 à 250 m) de l'Ance du nord n'a pas révélé de différences significatives entre les situations de maintien, de régression et d'absence de moulette (test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$). Il en est de même pour chacune des bandes tampon prises isolément.

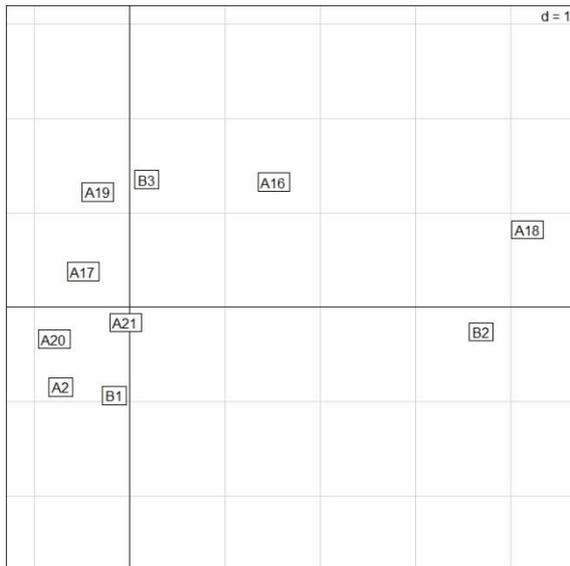


Figure 109 : Représentation des contributions des variables dans l'ACP de l'occupation des sols sur l'ensemble des bandes tampons (de 0 à 250 m)

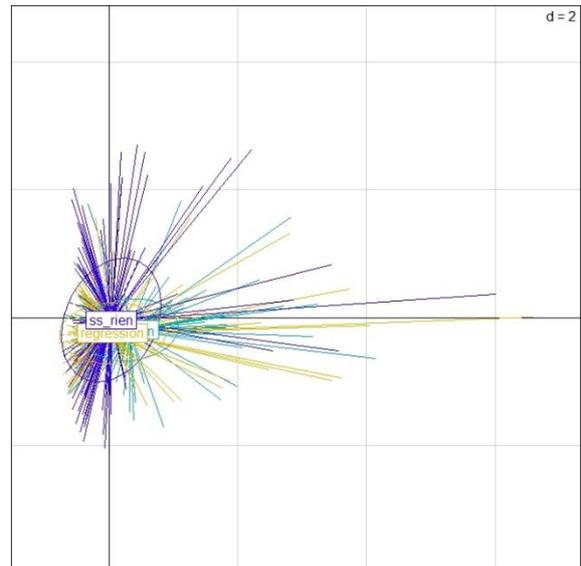


Figure 110 : Représentation de l'ACP de l'occupation des sols suivant les situations de maintien, de régression et d'absence sous forme d'ellipses sur l'ensemble des bandes tampons (de 0 à 250 m)

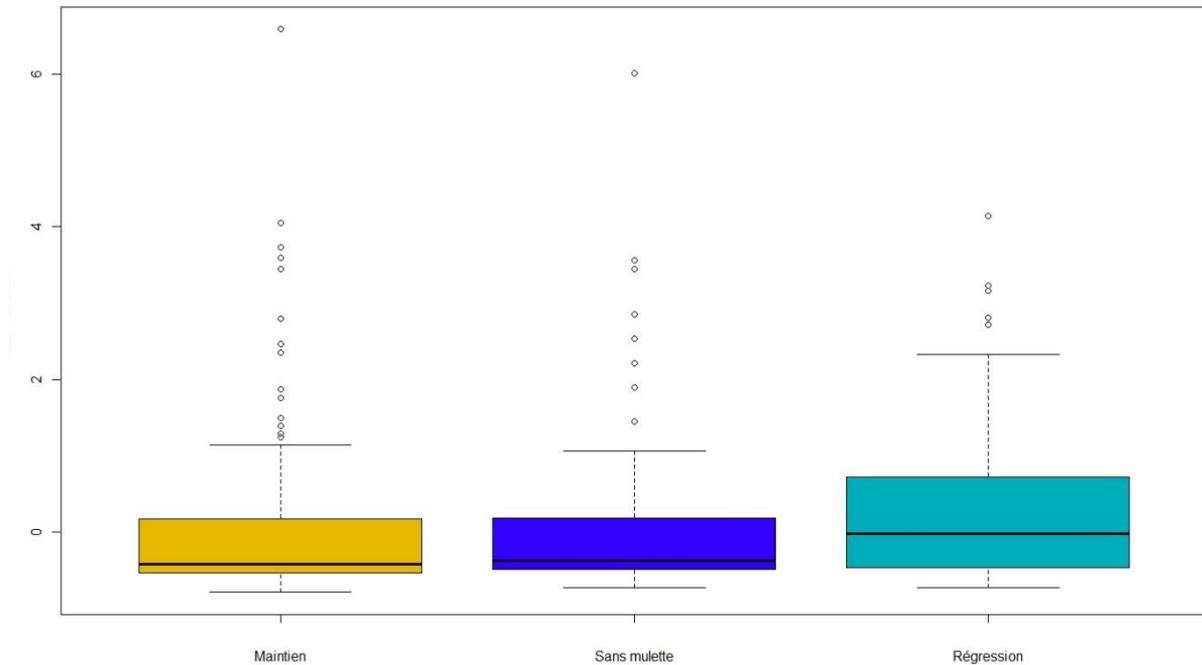


Figure 111 : Projection des situations de maintien, de régression et d'absence de moulettes perlières sur l'axe 1 de l'ACP

L'analyse des pentes minimales a fait ressortir des groupes différents au regard des situations vis-à-vis de la moulette perlière suivant le test de Tuckey. Ainsi, la pente minimale est distinctement plus faible quand il n'y a pas de moulettes par rapport aux situations de maintien (Figure 112 et Tableau 44). Par contre, la situation de régression se trouve être en position intermédiaire et appartient aux mêmes groupes que le maintien (groupe A) et l'absence de moulette (groupe B).

La pente maximale, quant à elle, ne possède pas d'effet sur les situations de maintien, de régression ou l'absence de mulette (Figure 101 et Tableau 45).

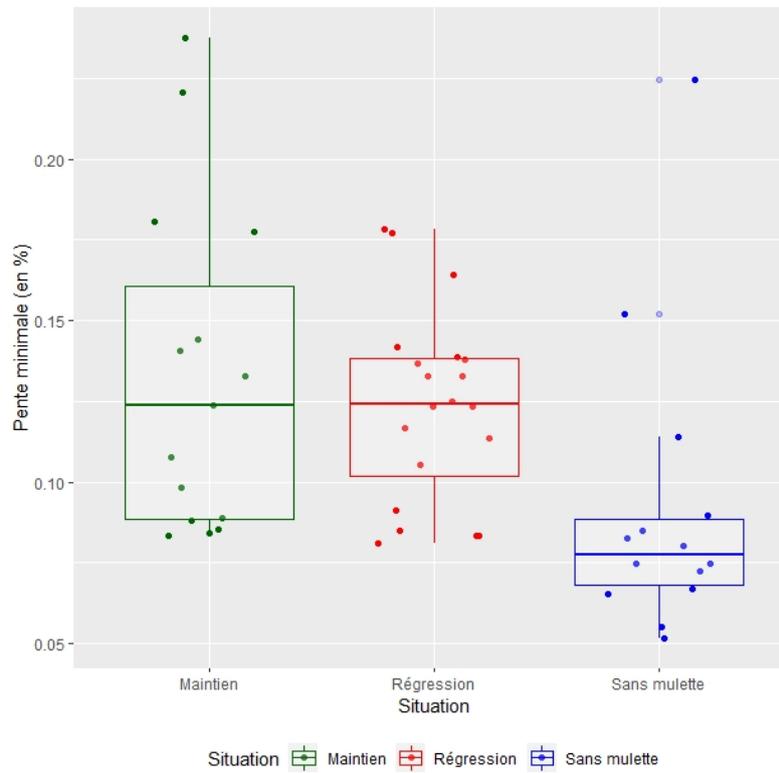


Figure 112 : Boîtes à moustaches des pentes minimales sur la bande tampon de 0 à 250 m suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de mulette perlière

Tableau 44 : Caractéristiques des pentes minimales et répartition des groupes suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de mulette perlière sur la bande tampon de 0 à 250 m d'après le test de Tuckey

Critère	Maintien	Régression	Sans mulette
Borne inférieure de l'IC	0,105	0,110	0,066
Borne supérieure de l'IC	0,161	0,137	0,118
Moyenne	0,133	0,124	0,092
Groupe	A	AB	B

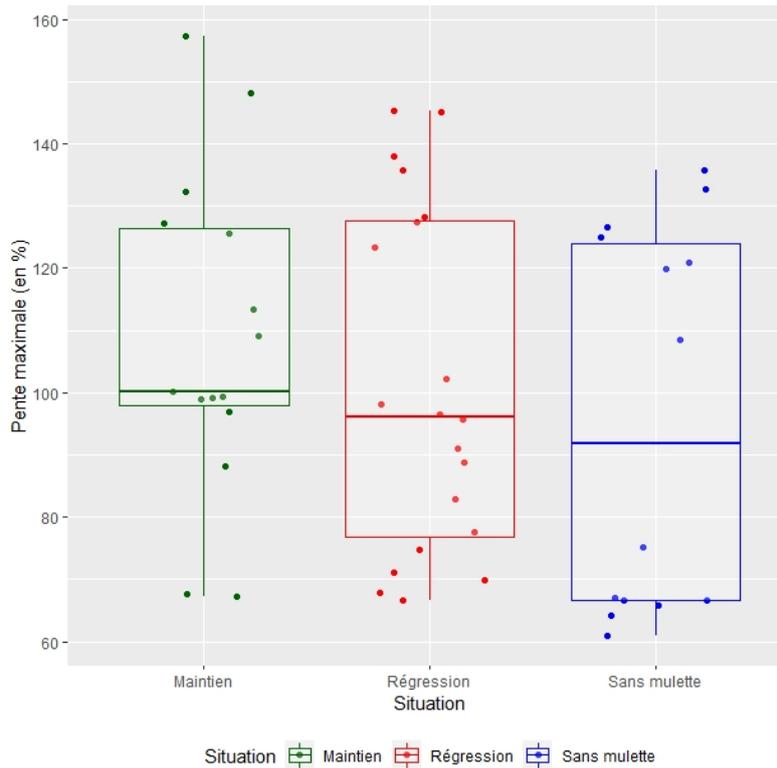


Figure 113 : Boîtes à moustaches des pentes maximales sur la bande tampon de 0 à 250 m suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de mulette perlière

Tableau 45 : Caractéristiques des pentes maximales et répartition des groupes suivant les situations de maintien, de régression et en l'absence de mulette perlière sur la bande tampon de 0 à 250 m d'après le test de Tuckey

Critère	Maintien	Régression	Sans mulette
Borne inférieure de l'IC	94,272	88,409	77,716
Borne supérieure de l'IC	123,043	114,197	113,053
Moyenne	108,658	101,303	95,385
Groupe	A	A	A

➤ *Modélisation*

La modélisation du maintien et à l'inverse de la disparition ne fait ressortir que deux variables liées aux hypothèses (Tableau 46). Ainsi, les cultures contribueraient à la disparition de l'espèce alors même qu'elles sont relativement éloignées de la rivière 100 à 200 m. La contribution est d'autant plus forte que la pente est marquée.

De même, la pente minimale est corrélée à la probabilité de disparition de la mulette perlière sur la bande tampon de 0 à 10 m. La pente minimale explique à hauteur de 11 % la probabilité de disparition.

Tableau 46 : Contribution des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative) sur la probabilité de maintien de la moulette perlière

Variables	Pentes	0-250	0-10	10-20	20-50	50-100	100-140	140-200	200-250
Pente maximale		↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Cultures	Modérée	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
	Forte	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Prairies temporaires	Modérée	↗	↘	↘	↘	↗	↗	↗	↗
	Forte	↘	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↗
*Prairies Permanentes	Modérée	↘	↗	↘	↘	↘	↗	↘	↘
	Forte	↗	↗	↗	↗	↗	↘	↗	↗
Forêts de conifères	Modérée	↗	↗	↘	↘	↘	↘	↗	↗
	Forte	↘	↘	↗	↘	↗	↘	↘	↘
Pente minimale		↗	↘	↘	↘	↗	↗	↗	↘
Forêts de feuillus		↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Forêts de feuillus	Faible	↗	↗	↗	↗	↗	↘	↗	↗
	Modérée	↗	↘	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Forte	↘	↘	↗	↗	↘	↘	↘	↗

↗↘ : contribution positive ou négative non significative ; ↘↗ : contribution positive ou négative significative (la taille est suivant le pourcentage de variance expliquée) ; ↗↗ : effet neutre ; ⊗ : interprétation impossible

Concernant les hypothèses émises sur la ripisylve, aucune hypothèse n'apporte d'élément quant à la probabilité de disparition de la mulette perlière (Tableau 47).

Tableau 47 : Contribution de la ripisylve sur la probabilité de maintien de la mulette perlière suivant des modèles linéaires généralisés en interaction (pente maximale x variable explicative)

Variabiles	X Pentes rivière	0-10 m
Haies	Faible	↗
	Forte	↗
Forêts de feuillus	Faible	↗
	Forte	↗
Forêts de conifères	Faible	↘
	Forte	↘
Strate arborée	Faible	↗
	Forte	↘

6.3. Discussion

Les hypothèses émises quant aux variables expliquant la présence de la mulette perlière ne tiennent que partiellement. La situation est vraisemblablement plus complexe que les hypothèses émises (Tableau 35). L'interprétation des modèles linéaires généralisés en interaction sont plus riches d'enseignements que les GLM en additifs. Ces premiers modèles révèlent que les forêts de conifères expliquent une part importante de la probabilité de présence (de 19 à 30 % sur les bandes tampons de 0 à 100 m). Cet effet est à la fois favorable et défavorable suivant la pente. Sur une pente trop raide (supérieure à 83 - 112 % suivant la bande tampon), les conifères sont néfastes à la mulette perlière. Plus globalement, la fermeture du milieu par des ligneux sur des pentes supérieures à 31 – 68 % sur les bandes tampons de 0 à 20 m affectent la probabilité de présence de la mulette perlière. De mêmes les prairies permanentes et temporaires possèdent un effet important (de 11 à 32 %).

Cette situation est à l'inverse des hypothèses émises. Les raisons de l'effet bénéfique de l'ouverture du milieu sur la mulette perlière demeurent inconnues. Il est possible que cette situation soit due à l'alimentation de la mulette ou à des aspects d'équilibre hydro-sédimentaire encore mal cernés.

Au regard de ces conclusions, la régression de la mulette perlière pourrait alors s'expliquer par la progression des ligneux. En effet, tout au long de l'antiquité et du moyen-âge, il existe de nombreux témoignages de l'abondance de la mulette perlière. Durant cette période, les surfaces forestières ont certes été variables mais probablement rarement aussi importantes qu'en ce moment. La régression actuellement constatée pourrait ainsi avoir commencé suite au minimum forestier (situé vers 1850) quand la surface forestière française était à son plus bas niveau. Le détournement de la ressource sylvicole au profit des ressources fossiles, la désertification rurale et les plantations de résineux ont eu pour effet de favoriser la progression des ligneux sur des secteurs peu productifs sur le plan agricole. Cette progression forestière semble avoir pu être bénéfique jusqu'à un certain niveau. En outre, les secteurs qui ont été rapidement délaissés sont ceux où l'accès est difficile pour la mécanisation. Il s'agit

principalement des secteurs les plus en pentes qui se révèlent être aussi les plus discriminants quant à la présence de la mulette perlière.

A l'échelle plus réduite de la ripisylve, il n'a pas été constaté d'effet particulier quelle que soit la nature des ligneux et leur ampleur. Il est à noter que l'effet limitant des pentes faibles est en lien avec le colmatage sédimentaire. Le courant ralentissant, la décantation se produit alors plus facilement. La Figure 112 illustre une très nette différence de pente minimale entre les situations de maintien/régression par rapport à celle d'absence. Toutefois, le Tableau 46 indiquant les variables contribuant à la régression de la mulette fait ressortir la pente minimale comme un facteur significatif. Cette situation illustre donc une évolution temporelle de l'espèce en lien avec cette pente traduisant alors une augmentation du colmatage sédimentaire. Aussi, la maîtrise des apports de sédiments fins est nécessaire afin de limiter ce colmatage.

Au regard de la bibliographie, il semble que cette approche soit la première en son genre. Seules deux études portent sur ces aspects chez la mulette perlière. LOIS (2015), dans le cadre de sa thèse avait notamment intégré la pente et le couvert forestier afin de mieux comprendre la répartition de la mulette perlière en Galice (il y avait 16 variables en tout mais 2 communes à la présente étude). Mais elle avait choisi des mailles de 40 m de côté. En outre, la forêt était une variable qualitative (absence ou présence) et sans précision quant à sa composition. Et la méthode utilisée pour la modélisation était celle de Maxent (PHILLIPS *et al.*, 2006). Les résultats qu'elle avait obtenus indiquaient une nette préférence de la mulette pour la forêt ainsi que pour les pentes faibles (inférieures à 30 %). Mais son ambition était en lien avec sa zone d'étude : comprendre la répartition de l'espèce à une grande échelle en intégrant des aspects tels que le climat (précipitation et température) et les poissons hôtes (saumons et truites). Ces aspects ne présentent pas d'intérêt à l'échelle de l'Ance et de l'Arzon qui représentent une aire plus réduite et donc peu de variation climatique (dans l'espace). Cela étant, les modifications climatiques (dans le temps) pourraient bien avoir des implications sur les populations de l'Ance et de l'Arzon sans qu'il soit pour l'instant évident d'en comprendre les effets.

L'autre étude similaire portant sur la mulette perlière a été menée en Suède (ÖSTERLING & HÖGBERG, 2014). Ces auteurs avaient comparé l'intégralité des bassins versants correspondant à différents niveaux de fonctionnalité (avec recrutement, avec un recrutement limité et sans recrutement). Le paysage concerné était très largement forestier. Le principal résultat était que les coupes claires portaient atteinte à la fonctionnalité de la mulette. Les auteurs concluaient en mettant l'accent sur la nécessité de prendre en compte cet aspect et en particulier sur la ripisylve en garantissant son intégrité.

Mais plus généralement, les résultats de cette étude inédite incitent fortement à étendre la réflexion à d'autres bassins versants du Massif central au minimum et à intégrer des variables supplémentaires à celles étudiées ici (températures, altitude, pluviométrie, durée de sol enneigé en particulier). Cela permettra à la fois de mieux comprendre les exigences de l'espèce à l'échelle globale mais aussi d'avoir des préconisations de gestion plus proches des exigences de l'espèce.

Cependant, grâce à ces premiers résultats, il est possible d'ores et déjà de proposer des actions à mener afin de favoriser les conditions habitationnelles de la mulette perlière. Ainsi, il est recommandé de convertir les forêts de conifères sur les pentes les plus raides en prairies permanentes (suivant les éléments chiffrés du 6.2.2). Il est préférable d'utiliser alors des méthodes douces (sans dessouchage et de façon progressive dans la mesure du possible) plutôt qu'une coupe à blanc.

Au niveau de la ripisylve, l'absence d'effet de la nature et de l'ampleur des ligneux sur la mulette perlière contribue à argumenter sur la nécessité d'une ripisylve nécessaire à la régulation thermique de la rivière (afin d'éviter des pics de chaleur). Il est cependant préférable au regard des exigences de

la moulette de favoriser en retrait les prairies et en particulier permanentes. Si ces prairies devaient être destinées au pâturage, une maîtrise de l'accès à la rivière serait alors indispensable.

La localisation de ces actions peut donc être précisée afin d'être géographiquement priorisée suivant la Figure 114 et la Figure 115 : Détail géographique de la probabilité de présence en fonction de l'occupation des sols et de la pente (Ance du nord). De façon générale, il n'est pas possible de faire ressortir des secteurs nettement négatifs et d'autres positifs tans les situations sont imbriquées.

Attention, il est nécessaire de noter que cette carte simplifie quelque peu les modèles proposés car les coefficients directeurs sont calculés par habitat (et non pas en fonction de leur surface proportionnelle). Cette dernière variable étant alors considérée comme qualitative. En effet, il y a alors une ordonnée à l'origine par type d'habitat. Cette solution semble être la plus appropriée car elle évite de trop suivre une à une les données (« surfitage »).

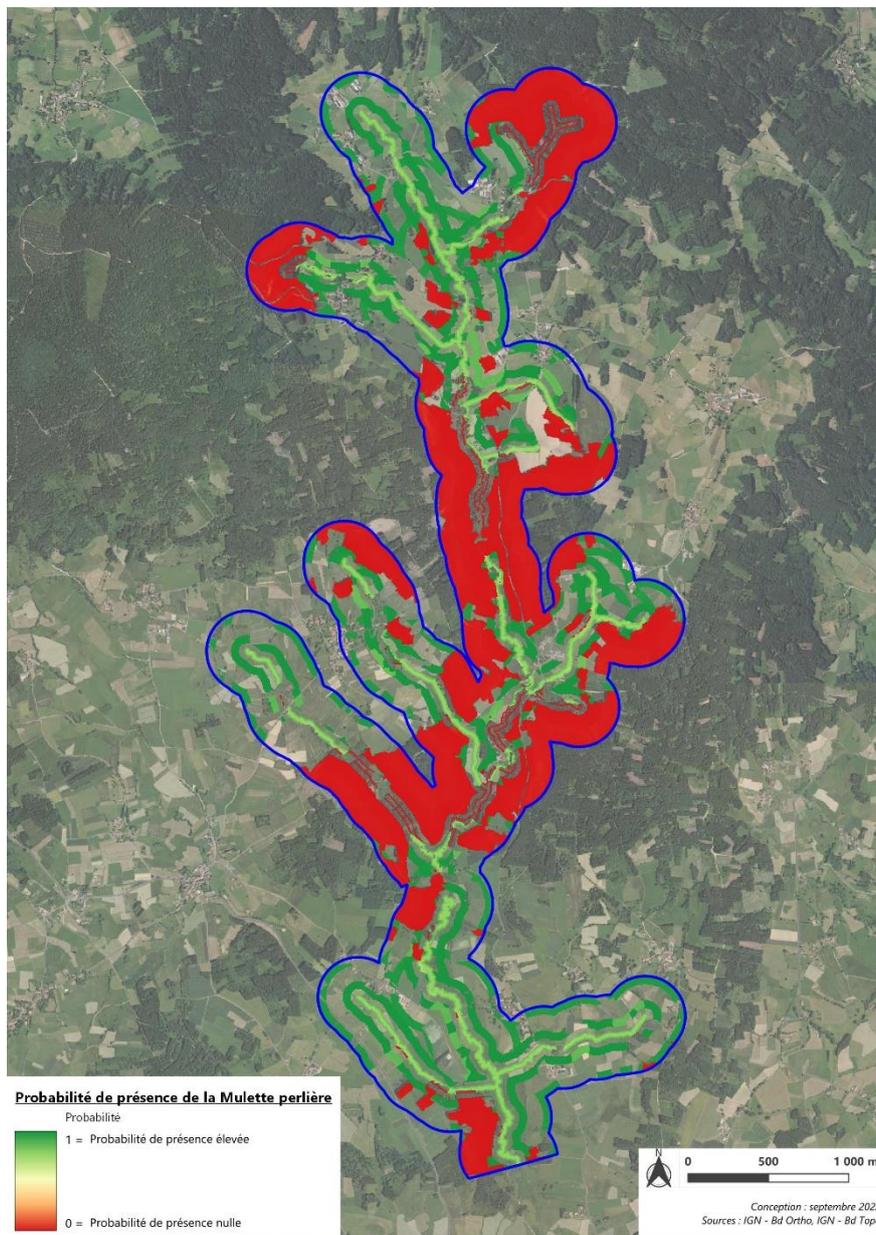


Figure 114 : Probabilité de présence en fonction de l'occupation des sols et de la pente (vue d'ensemble des bassins versants de l'Arzon)

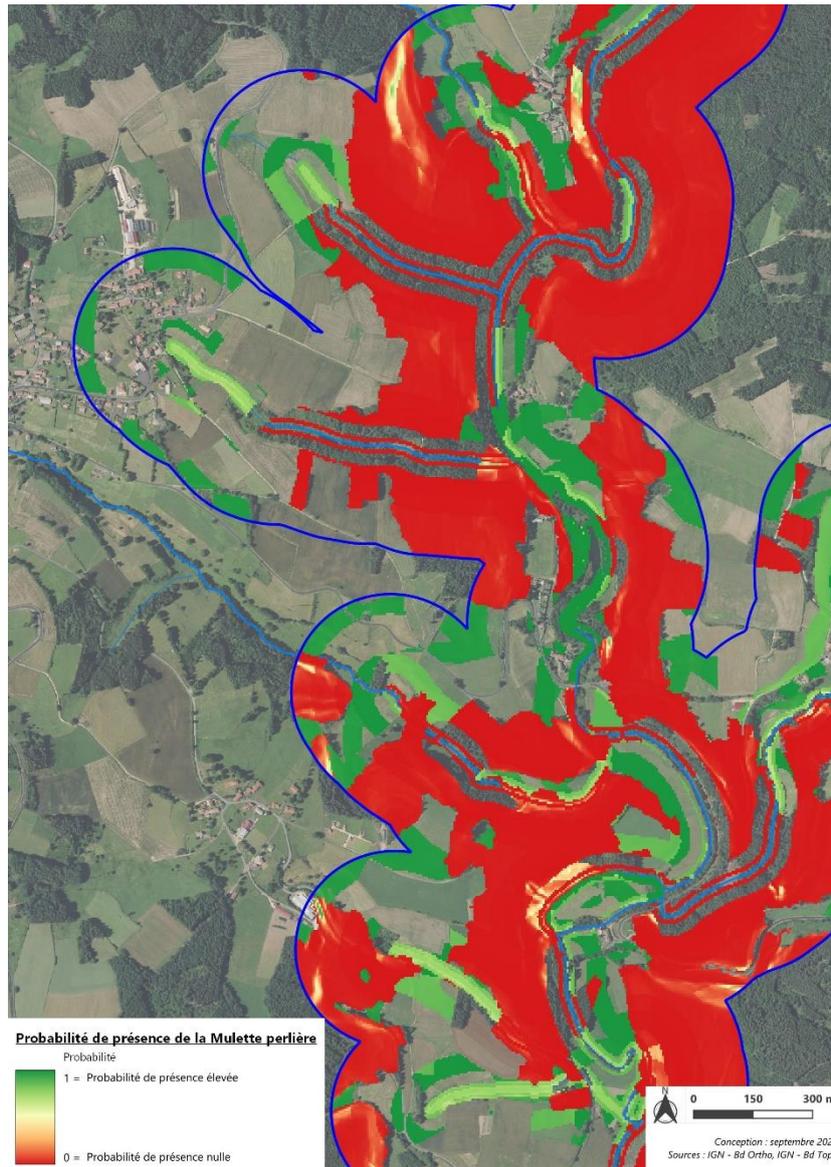


Figure 115 : Détail géographique de la probabilité de présence en fonction de l'occupation des sols et de la pente (Ance du nord)

Toutefois, des réserves sont émises du fait du peu d'effet positif des prairies tant permanentes que temporaires. En effet, seules les prairies permanentes possèdent un effet significativement positif sur la bande tampon de 0 à 10 m. La non significativité sur les autres bandes tampon révèle probablement une grande hétérogénéité des contributions de ces prairies et possiblement en lien avec les pratiques agricoles qui peuvent y être mises en œuvre. Aussi, la mise en œuvre de pratiques douces (chargement faible mais suffisant pour contenir la progression de ligneux, absence de fertilisation, d'utilisation d'herbicides, de retournement) semble être préférable.

Par ailleurs, on notera que la répartition des pixels en fonction de leur probabilité de présence la moulette est très clivée (Figure 116 et Figure 117). En effet, nombreux sont les pixels qui présente une probabilité nulle ou très faible, moins nombreux sont ceux avec une probabilité proche de 1 et entre ces deux extrêmes, il n'y a pas de pixels concernés. Ce résultat reflète donc des situations extrêmement contrastées. Cela pourrait expliquer qu'il puisse y avoir passage d'une situation favorable à l'espèce à rapidement une situation défavorable.

De même, l'Arzon compte plus de pixels proches de 1 que l'Ance du nord révélant ainsi une plus grande menace sur ce dernier bassin versant. Ainsi, plus d'efforts semblent à produire sur cette surface.

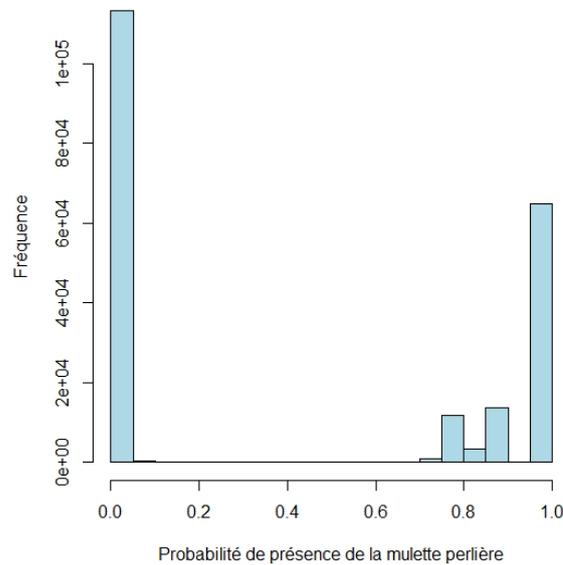


Figure 116 : Fréquences des pixels en fonction de la probabilité de présence pour le bassin versant de l'Arzon (bandes 0 à 250 m)

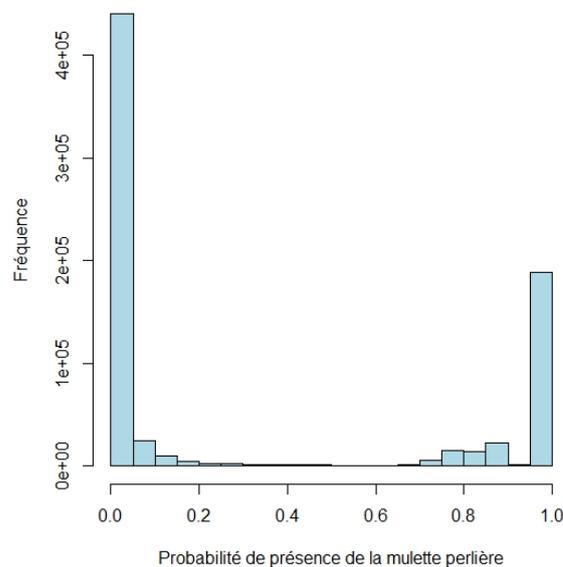


Figure 117 : Fréquences des pixels en fonction de la probabilité de présence pour le bassin versant de l'Ance (bandes 0 à 250 m)

En outre, avec une espèce longévive telle que la moulette perlière les effets néfastes mettent un temps relativement long avant d'être perceptibles. Ainsi, le réchauffement atmosphérique entraînant une augmentation des précipitations sous forme de pluie au détriment de la neige affecte le flux

sédimentaire en favorisant l'apport de particules fines plutôt que de particules grossières dans la rivière. Dans ce contexte, il n'est pas à exclure que l'ouverture du milieu ait un effet néfaste sur la moule par ce biais.

Parallèlement, des études sur le plan sédimentaire et en particulier sur la contribution des parcelles quant à l'apport sédimentaire et sa nature semblent être utiles. L'analyse devrait alors porter sur les différents cas de figure en incluant des variables telles que la pente, le chargement, la nature du pâturage (bovin, ovin et éventuellement caprin) ...

De même, il serait particulièrement intéressant d'étendre ce genre d'approche à d'autres sites ailleurs en France afin de tester si le constat fait localement demeure le même plus globalement à l'échelle du Massif central ou nationale par exemple.

Conclusion générale

Cette étude portant sur la synthèse de nombreux indicateurs et suivis est riche d'enseignements. Elle contribue à mieux comprendre le fonctionnement de l'habitat en lien avec les exigences de la moule perlière. Plusieurs prédictions sont remises en cause par les résultats obtenus. Du fait de la surface importante de conifères, le pH était supposé être trop bas pour répondre aux exigences de la moule. Or, l'inverse a été constaté. Il est manifestement trop haut.

On pourra aussi retenir que les évolutions thermiques constatées indiquent que l'avenir de l'espèce et de son poisson-hôte (la truite fario) s'annoncent compliqués. A la faveur d'un pic de chaleur intense et long, il pourrait bien y avoir une mortalité conséquente. Toutefois, cela accentuera un déclin qui semble inéluctable actuellement.

Quelques éléments bien que très fragiles pourraient laisser penser que la moule perlière soit aussi présente dans des affluents de l'Ance. Des prospections ciblées en premier lieu grâce à l'ADN environnemental (ADNe) puis le cas échéant à l'aquascope pourraient permettre la découverte de quelques individus supplémentaires.

Enfin, l'analyse de l'occupation des sols du bassin versant apporte des éléments intéressants. On retiendra que la fermeture des milieux les plus pentus affecterait la présence de la moule perlière. Ces résultats contre-intuitifs incitent donc à rouvrir de façon douce ces secteurs identifiés. A l'inverse, la fermeture des milieux avec une pente faible est corrélée avec la présence de la moule. Dans l'idéal, un fond de vallée forestier (surtout de feuillus) avec des pentes dénudées présenteraient un paysage favorable à l'espèce. Cependant, un élargissement de ce genre d'étude sur d'autres bassins versants en particulier avec des populations fonctionnelles apporterait de plus amples et pertinents enseignements.

Références bibliographiques

- ALABASTER J.S. & LLYOD R., 1980. Water quality criteria for fresh water fish, Butter Worths Ed., London, 297p.
- ATHOS ENVIRONNEMENT, 2019. Surveillance et contrôle des populations hôtes de moules perlières sur l'Ance du Nord amont – 2019. Rapport pour la Communauté de Communes Ambert Livradois Forez. 83 pages + annexes.
- BELAMY T., BAUDRIMONT M., CORDIER M.-A., DASSIE E., GOURVES P.-Y., LEGEAY A., 2022. Sensitivity of newly transformed juveniles of the freshwater pearl mussel: *Margaritifera margaritifera* to acute toxicity of a wide range of contaminants. *Hydrobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04827-7>

- BREHENY P & BURCHETT W., 2017. Visualization of Regression Models Using visreg. *The R Journal*, 9 : 56-71.
- BURNHAM K. P. & ANDERSON D. R., 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer-Verlag.
- COCHET G., 2009. La moule perlière dans l'Ance du nord. Rapport pour le Parc naturel régional Livradois-Forez. 33 pages.
- CRISP D.T., 1996. Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in freshwater with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia* 323, 201-221.
- DRAY S & DUFOUR A. 2007. "The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists." *Journal of Statistical Software* : 22 (4) : 1-20. doi: 10.18637/jss.v022.i04 (URL: <https://doi.org/10.18637/jss.v022.i04>).
- ELLIOTT J.M., 1975. The growth rate of brown trout (*Salmo trutta* L.) fed on maximum rations. *Journal of Animal Ecology* 44, 805-821.
- ELLIOTT J.M., 1981. Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. pp 209-245 In Stress and fish, Pickering A.D (ed), Academic Press London.
- ELLIOTT J.M. & HURLEY M.A, 2001. Modelling growth of brown trout, *Salmo trutta*, in terms of weight and energy units. *Freshwater Biology* 46, 679-692.
- GEIST, J. & AUERSWALD K., 2007. Physicochemical stream bed characteristics and recruitment of the freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*). *Freshwater Biology* 52: 2299-2316.
- GEORGES B., MICHEZ A., PIEGAY H., HUYLENBROECK L., LEJEUNE P., BROSTAUX Y., 2021. Which environmental factors control extreme thermal events in rivers ? A multi-scale approach (Wallonia, Belgium). *PeerJ* 9(3):e12494. DOI: [10.7717/peerj.12494](https://doi.org/10.7717/peerj.12494)
- HANSEN J., SATO M., RETO R., 2022. Global température in 2021. 7 pages. <http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2022/Temperature2021.13January2022.pdf>
- LE S., JOSSE J., HUSSON F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1) : 1-18. 10.18637/jss.v025.i01
- LOIS S., 2015. Sampling, Modelling and Prediction for Freshwater Species Across River Ecosystems: An example with the Freshwater Pearl Mussel *Margaritifera margaritifera* (L.,1758). Thèse de doctorat. Université de Santiago de Compostella. 218 pages + annexes.
- LÜDECKE D., 2018. ggeffects: Tidy Data Frames of Marginal Effects from Regression Models. *Journal of Open Source Software*, 3 (26) : 772. doi: 10.21105/joss.00772 (URL: <https://doi.org/10.21105/joss.00772>).
- MENDIBURU (DE) F., 2021. agricolae : Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-5. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- MOATAR F., MEYBECK M., POIREL A, 2009. Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance à long terme : exemple de la Loire moyenne. Daily variability and its implication on long term river water quality surveys: the Middle Loire example. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences, pp.91-99. 10.1051/lhb/2009050.
- MUFF S., NILSEN E. B., O'HARA R., NATER C. R., 2021. Rewriting results sections in the language of evidence. *Trends in Ecology & Evolution*. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.10.009>
- ÖSTERLING M., HÖGBERG J.-O., 2014. The impact of land use on the mussel *Margaritifera margaritifera* and its host fish *Salmo trutta*. *Hydrobiologia*, 735, 213-220. DOI: 10.1007/s10750-013-1501-1
- PHILLIPS S. J., ANDERSON R. P., SCHAPIRE R. E.. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259
- RIOM S., 2021. Analyses physico-chimiques et du substrat sur trois stations à Moule perlière de l'Ance du Nord. Suivi 2021. Aquabio, EPAGE Loire Lignon. Cournon d'Auvergne. 60 pages

- ROBINSON D., HAYES A., COUCH S., 2021. broom: Convert Statistical Objects into Tidy Tibbles. R package version 0.7.9. <https://CRAN.R-project.org/package=broom>
- VENABLES W. N. & RIPLEY, B. D., 2002. Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0
- R CORE TEAM, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RÉGNIER C., PRIÉ V., BERNARD Y., BICHAIN J.-M., COMBRISSE D., CUCHERAT X., GARGOMINY O., LECAPLAIN B., LÉONARD L., NAUDON D., ROY C., RYELANDT J., BARAUD L., JEUSSET A., KIRCHNER F. & GIGOT G., 2021. La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Mollusques continentaux de France métropolitaine - Résultats d'évaluation. UICN Comité français, OFB & MNHN.
- SALONEN J.K. & TASKINEN J. 2017. Electrofishing as a new method to search for unknown populations of the endangered freshwater pearl mussel *Margaritifera margaritifera*: Electrofishing to search for *Margaritifera margaritifera*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 27(1) : 115–127.
- SIMON, O. P., HRUSKA, J., DORT, B., DOUDA, K., ŠVANYGA, J., BILÝ, M., HORACKOVA, J., ŠVARICKOVA, J., non daté. Three decades of active protection and population reinforcements of mollusc *Margaritifera margaritifera* as the flagship species for oligotrophic rivers in Czechia. Diaporama.
- VARLEY M.E., 1967. Water temperature and dissolved oxygen as environmental factors affecting fishes. pp 29-52 In *British freshwater fishes*, Fishing News, London.
- VRIGNAUD S., LELIEVRE H. & MOREAU C., 2016. Suivi des populations de moules perlières sur le site NATURA 2000 FR8201768 « Ruisseaux à Moule perlière du Boën, du Ban et Font d'Aix » - Lot 2, Caractérisation des habitats. Rapport pour le Syndicat mixte des Monts de la Madeleine. 48 pages + annexes.
- VRIGNAUD S., 2018. Etude des populations de moules perlières du site Natura 2000 FR8302040 « Rivières à Moules perlières de l'Ance du nord et de l'Arzon ». Rapport pour le Parc Naturel Régional Livradois-Forez. 46 pages + annexes.
- VRIGNAUD S., LELIEVRE H., MARTIN Y. & BRUNOD P., 2019. Identification des variables environnementales locales régissant la répartition des moules perlières sur le site Natura 2000 FR8302040 « rivières à Moules perlières de l'Ance du nord et de l'Arzon ». Rapport pour le Parc Naturel Régional Livradois-Forez. 46 pages + annexes.
- VRIGNAUD S., 2021. Compte-rendu du suivi de populations de moules perlières sur le bassin versant de l'Ance du nord (lot 1) - Année 5 – 2021. 34 pages + annexes.
- WASSON J.-G., MALAVOI J.-R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L., 1998. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref éditions. Paris.

Annexes

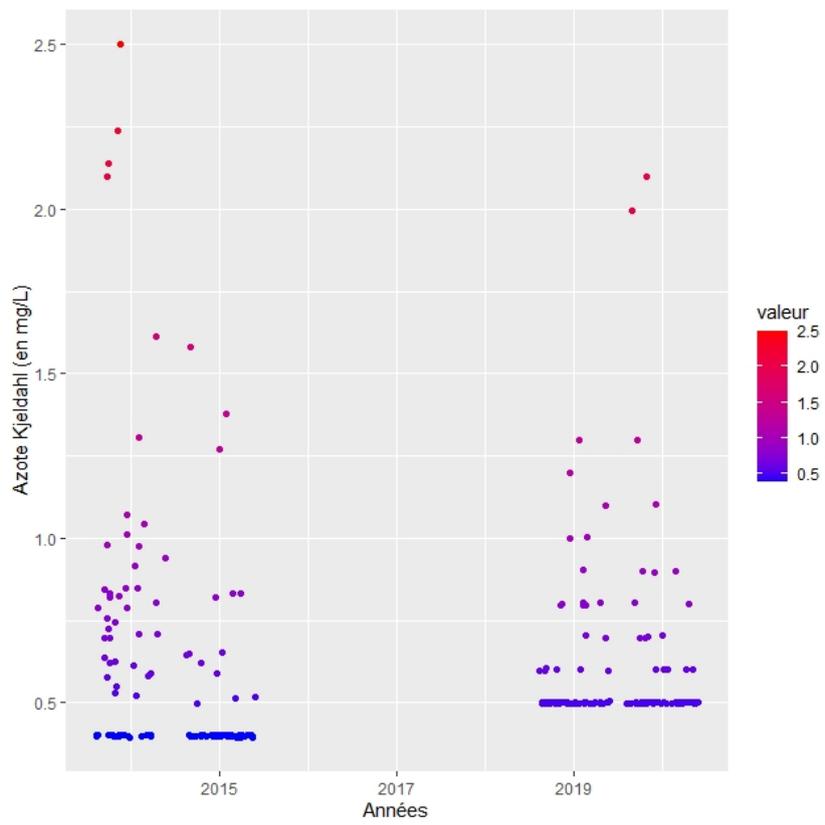
Annexe 1 : Densités de poissons (en effectifs) lors des pêches électriques d'Athos Environnement (2019)

Lieu-dit	Commune	X	Y	TRF	CHA	VAI	LPP	GAR	GOU	OBR	LOF	CHE	PES	CAR	PFL
Prabouré	Saint-Anthème	767939,98	6499359,96	0,068	0,123	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Le Roure	Saint-Clément-de-Valorgue	771621,92	6489935,87	0,090	0,464	0,009	0,254	0,052	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004
Le Rodier	Saint-Julien d'Ance	771910,42	6468188,55	0,093	0,240	0,014	0,003	0,000	0,011	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051
Moulas	Solignac sous roche / Tiranges	778714,5	6463082,55	0,048	0,094	0,107	0,000	0,000	0,123	0,000	0,005	0,003	0,000	0,000	0,015
Le Chalard	Saint-Anthème	771885,14	6492813,34	0,699	0,126	0,000	0,262	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tronel	Saint-Anthème	769672,56	6494829,88	0,135	0,604	0,000	0,396	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Graterelle	Viverols	769549,41	6480871,63	0,315	0,616	0,907	0,461	0,000	0,000	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
Les Genestoux	Saillant	772110,32	6481651,3	0,272	0,157	0,392	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Le Bouchet	Saint-George-Lagricol	770772,46	6467103,86	0,496	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,002	0,023	0,000	0,002
Moulin du Sap	Saint-Pal-de-Chalencon	773773,24	6471746,67	0,105	0,000	0,235	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,004	0,409

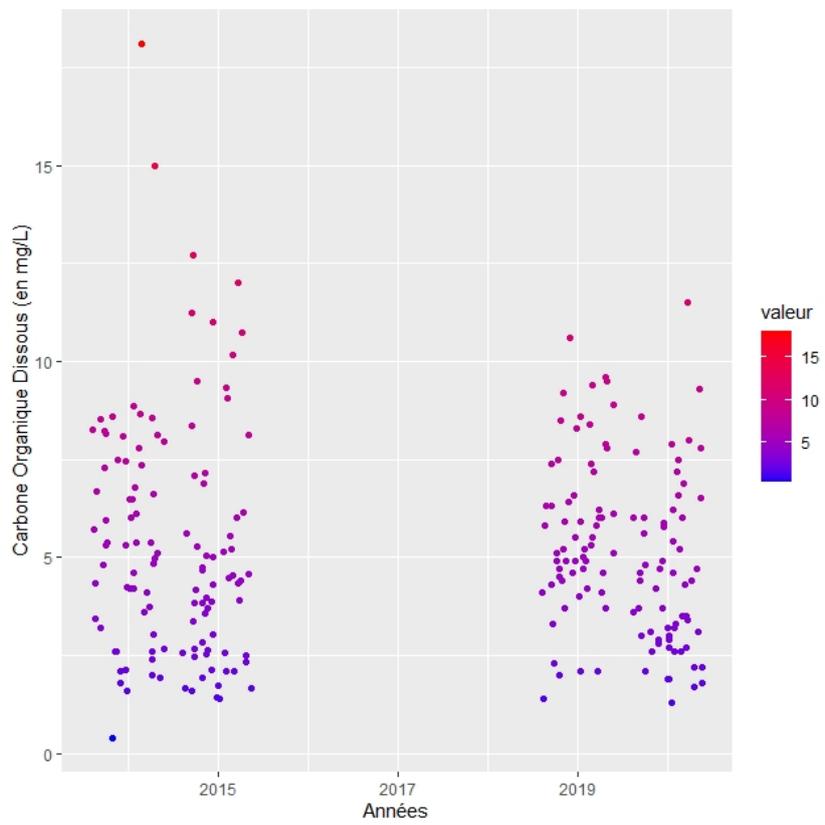
Annexe 2 : Densités de masse de poissons (en g/m²) lors des pêches électriques d'Athos Environnement (2019)

Lieu-dit	Commune	X	Y	TRF	CHA	VAI	LPP	GAR	GOU	OBR	LOF	CHE	PES	CAR	PFL
Prabouré	Saint-Anthème	767939,98	6499359,96	1,880	0,793	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Le Roure	Saint-Clément-de-Valorgue	771621,92	6489935,87	5,149	1,907	0,024	1,080	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034
Le Rodier	Saint-Julien d'Ance	771910,42	6468188,55	3,512	1,317	0,027	0,021	0,000	0,156	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	1,301
Moulas	Solignac sous roche / Tiranges	778714,5	6463082,55	2,703	0,452	0,179	0,004	0,000	1,336	0,000	0,027	0,122	0,000	0,000	0,316
Le Chalard	Saint-Anthème	771885,14	6492813,34	10,169	1,280	0,000	0,718	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tronel	Saint-Anthème	769672,56	6494829,88	4,229	3,590	0,000	1,381	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Graterelle	Viverols	769549,41	6480871,63	8,229	1,942	1,435	1,507	0,000	0,000	0,000	0,256	0,000	0,000	0,000	0,000
Les Genestoux	Saillant	772110,32	6481651,3	4,332	0,764	1,350	1,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Le Bouchet	Saint-George-Lagricol	770772,46	6467103,86	7,988	0,000	0,007	0,000	0,071	0,000	0,000	0,000	0,005	0,202	0,000	0,045
Moulin du Sap	Saint-Pal-de-Chalencon	773773,24	6471746,67	5,372	0,000	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,049	0,000	0,000	0,231	7,176

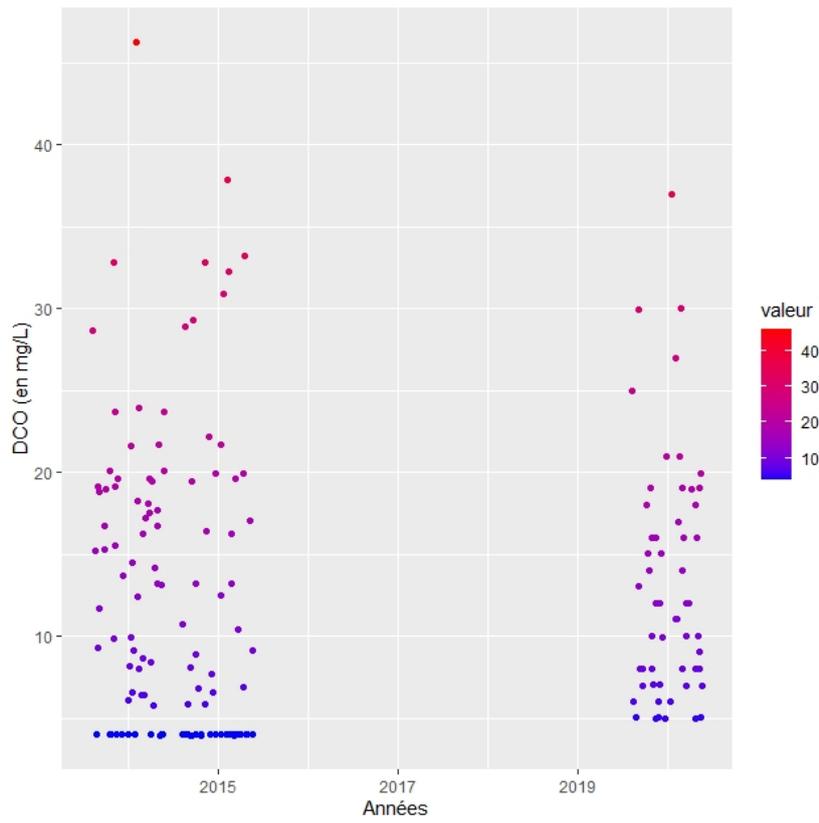
Azote Kjeldahl



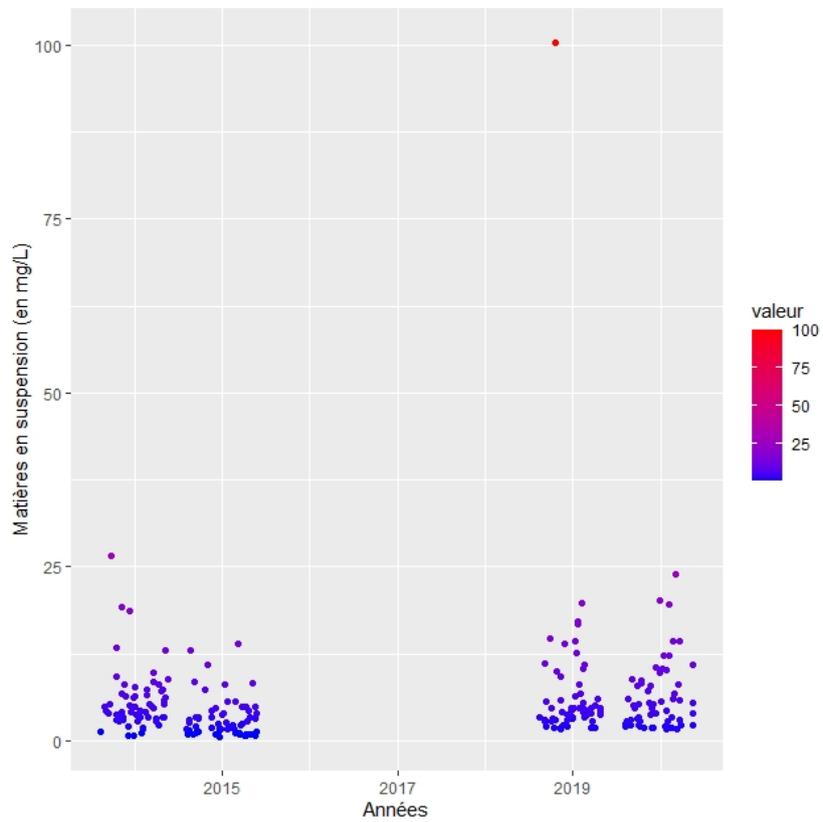
Carbone organique dissous

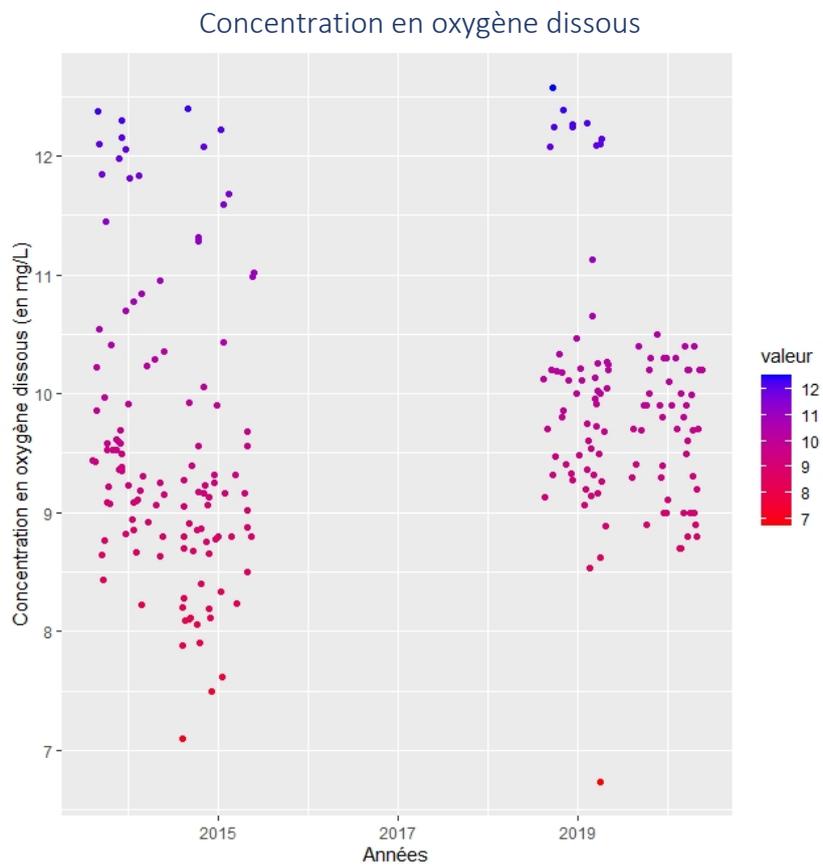
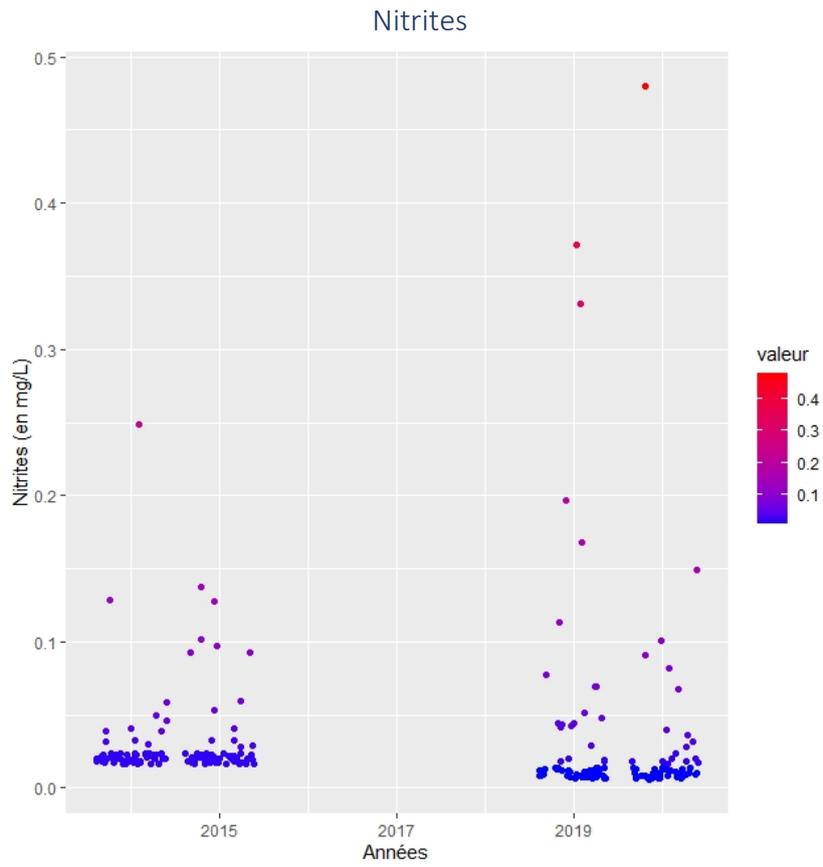


Demande Chimique en Oxygène

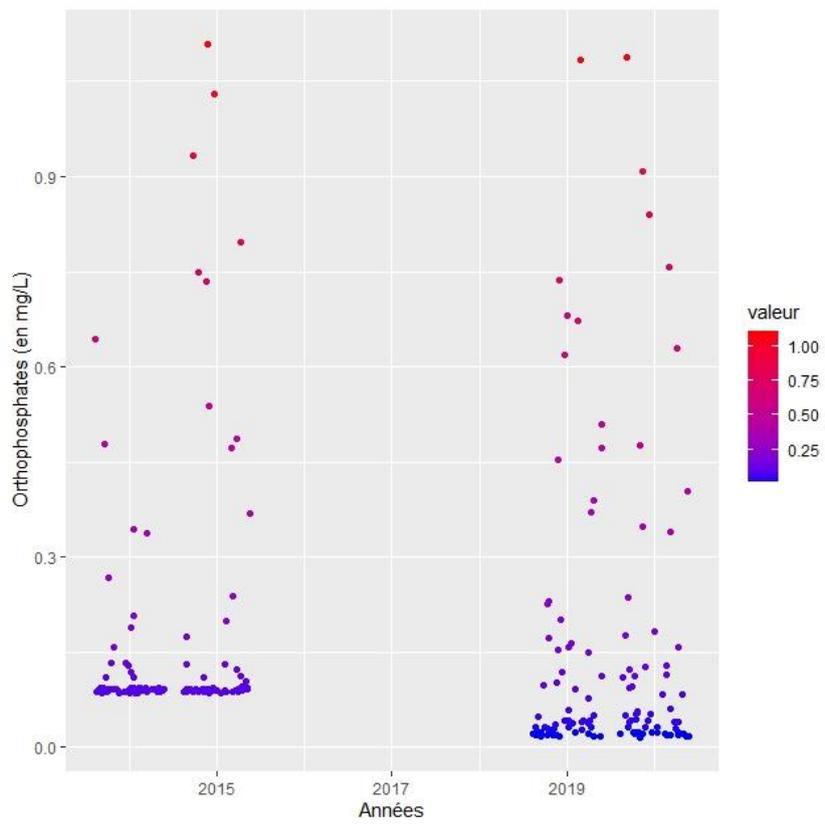


Matières en suspension

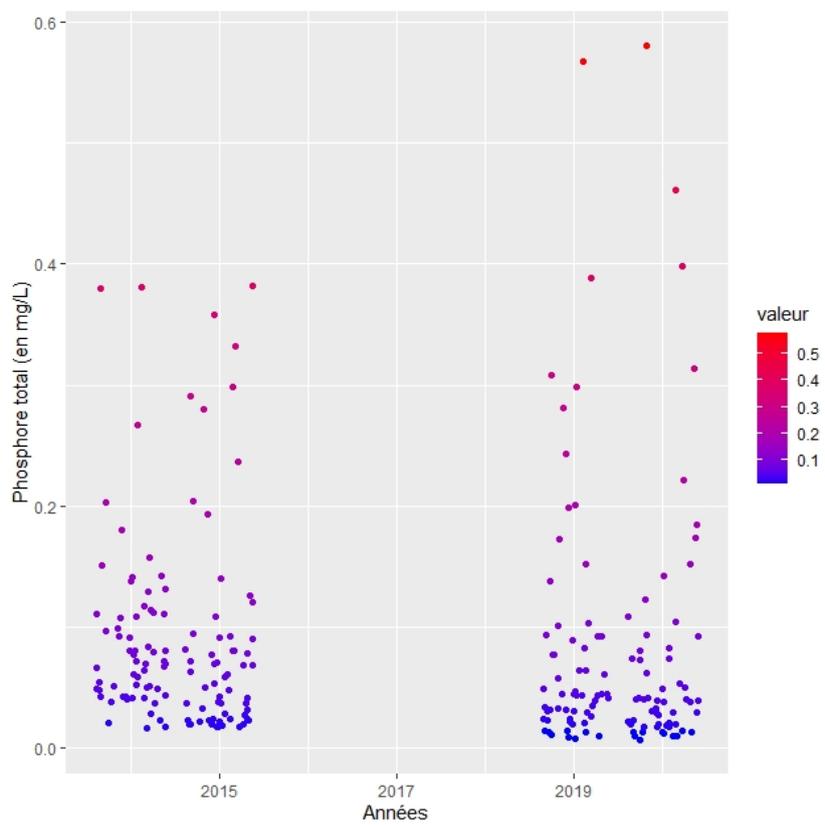




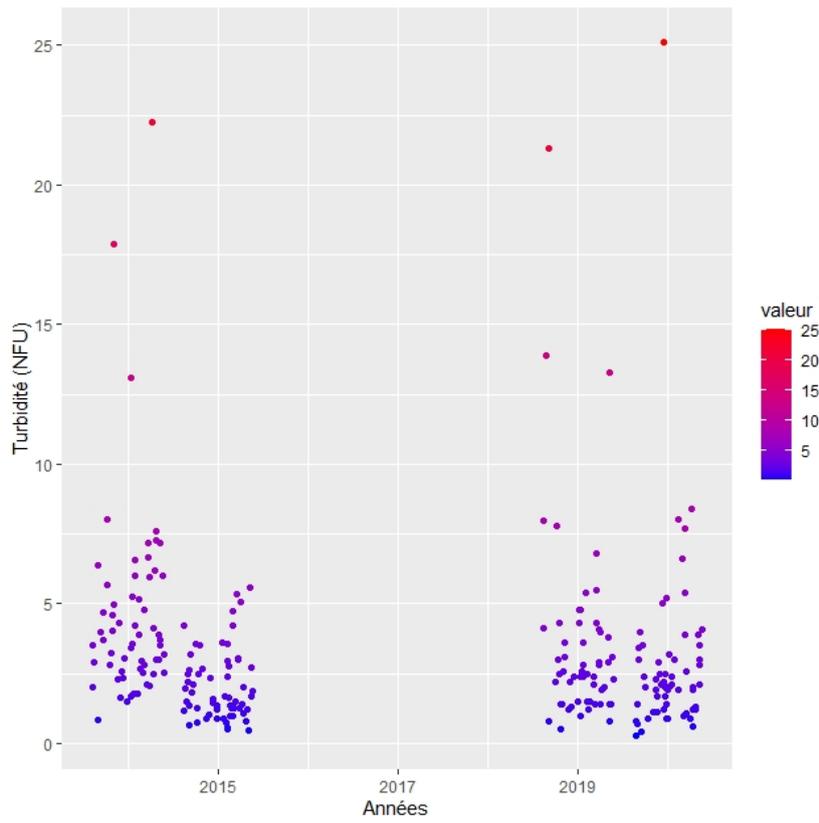
Orthophosphates



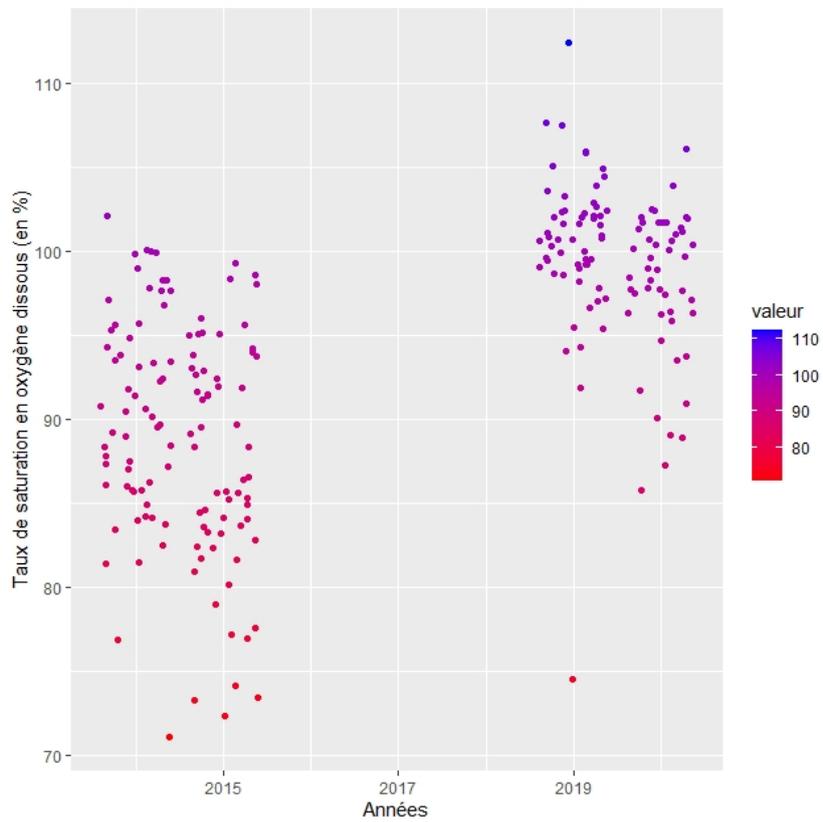
Phosphore total



Turbidité



Taux de saturation en oxygène dissous



Annexe 4 : Codes des espèces de poissons et écrevisses

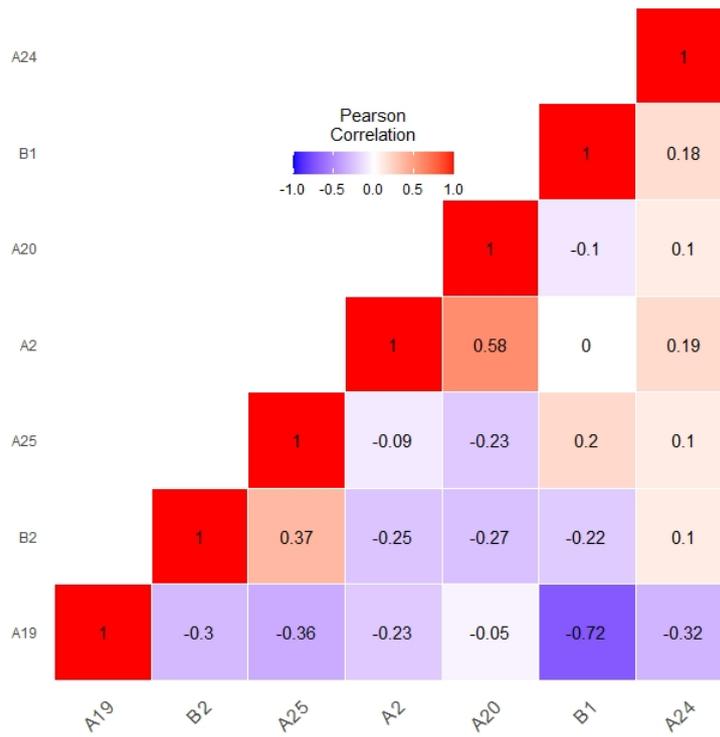
Code	Nom français	Nom latin
TRF	Truite commune	<i>Salmo trutta fario</i>
CHA	Chabot commun	<i>Cottus gobio</i>
VAI	Vairon	<i>Phoxinus phoxinus</i>
LPP	Lamproie de Planer	<i>Lampetra planeri</i>
GAR	Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>
PFL	Ecrevisse signal	<i>Pacifastacus leniusculus</i>
GOU	Goujon	<i>Gobio gobio</i>
OBR	Ombre	<i>Thymallus thymallus</i>
LOF	Loche Franche	<i>Barbatula barbatula</i>
CHE	Chevaine commun	<i>Squalius cephalus</i>
PES	Perche soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>
CAR	Carpe argenté	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>

Annexe 5 : Matrices de corrélation pour les modèles linéaires généralisés binomiaux

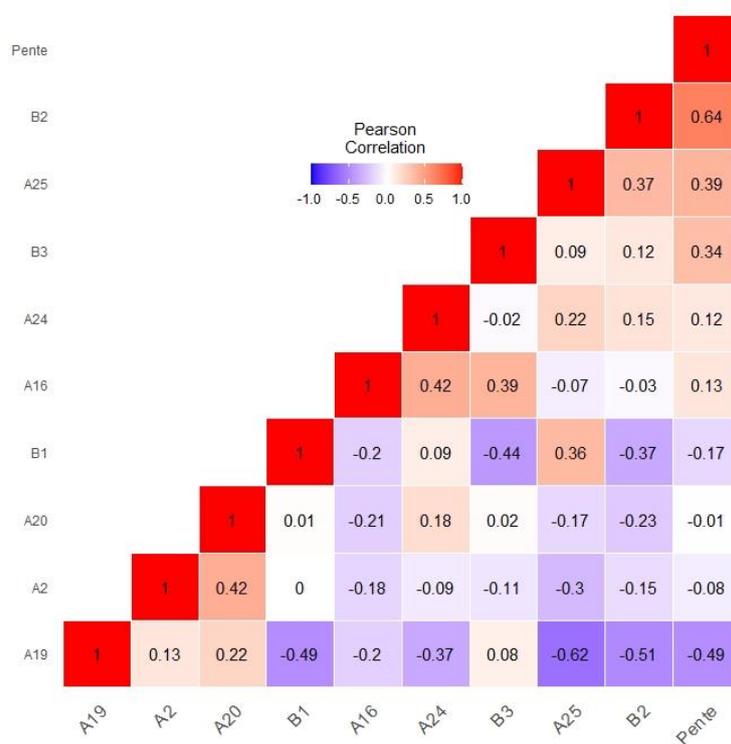
Codes des variables

Catégorie regroupée	Catégorie initiale	Code de la catégorie
Conifères	Forêt fermée à mélange de conifères	B1
	Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus	
	Forêt fermée de conifères purs en îlots	
	Forêt fermée de douglas pur	
	Forêt fermée de mélèzes purs	
	Forêt fermée de pins sylvestres purs	
	Forêt fermée de sapin ou épicéa	
	Forêt ouverte de conifères purs	
Feuillus	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants	B2
	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères	
	Forêt fermée de feuillus purs en îlot	
Forêt indéterminée	Bois	B3
	Forêt fermée sans couvert arboré	
	Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères	
Culture	Culture	A2
Haie	Haie	A16
Lande	Lande ligneuse	A17
Milieu aquatique	Milieu aquatique	A18
Prairie permanente	Prairie permanente	A19
Prairie temporaire	Prairie temporaire	A20
Zone artificielle	Zone artificielle	A21
Pente (moyenne)	Pente (moyenne)	A23
Pente (minimale)	Pente (minimale)	A24
Pente (maximale)	Pente (maximale)	A25

Entre les variables à l'échelle du bassin versant (0 à 250 m)

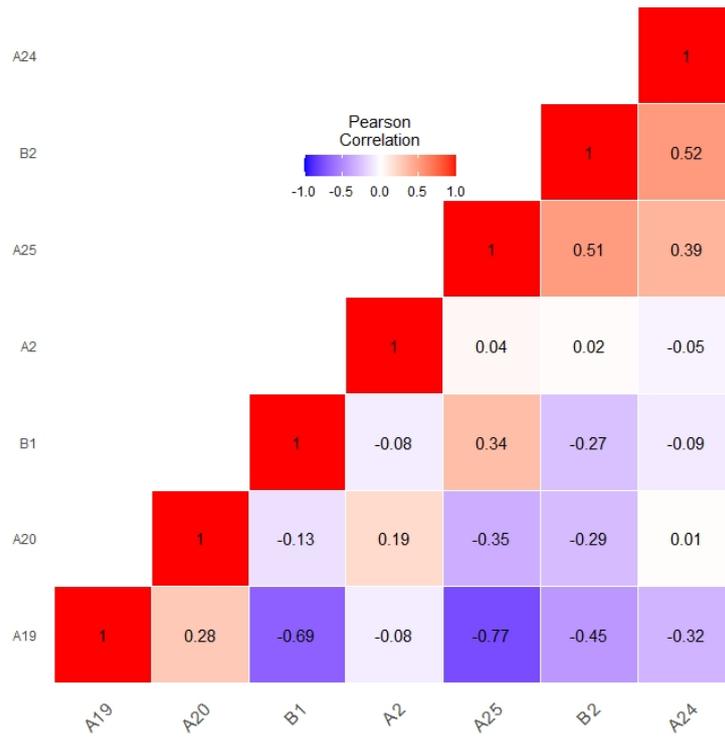


Entre les variables sur la bande 0 à 10

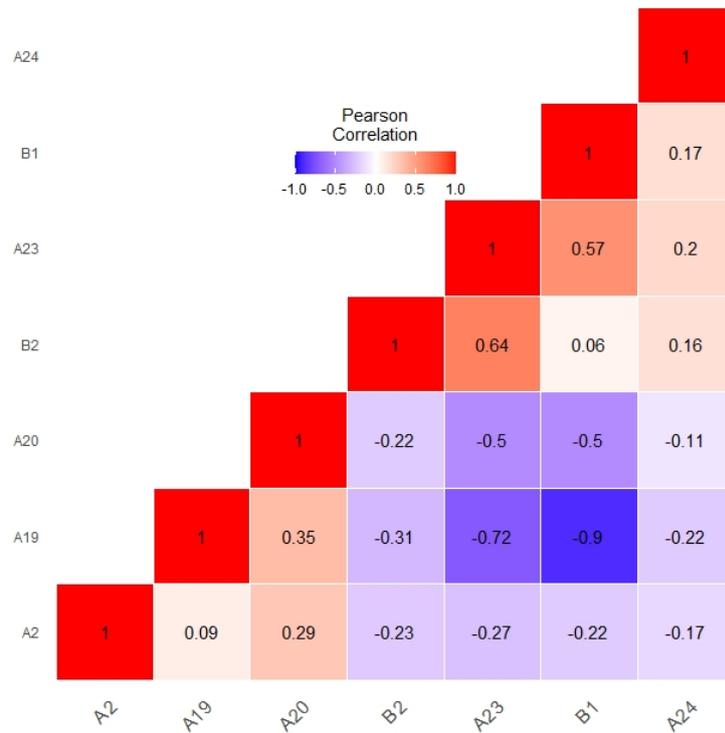


Entre les variables sur la bande 10 à 20 m

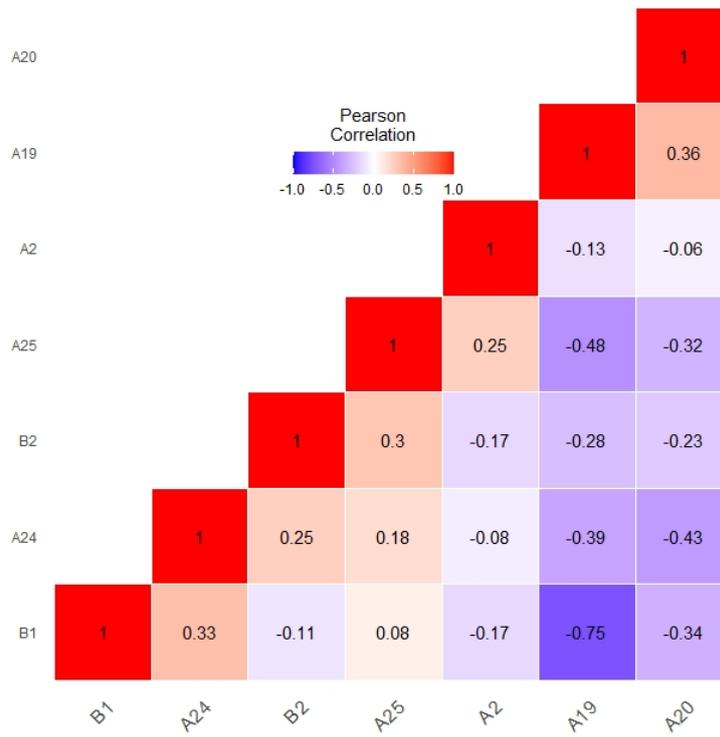
Entre les variables sur la bande 20 à 50 m



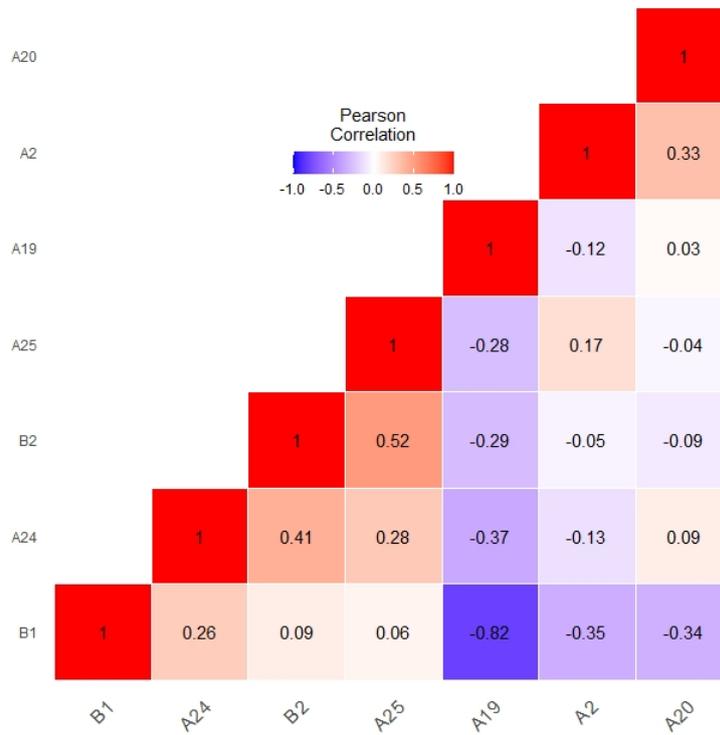
Entre les variables sur la bande 50 à 100 m



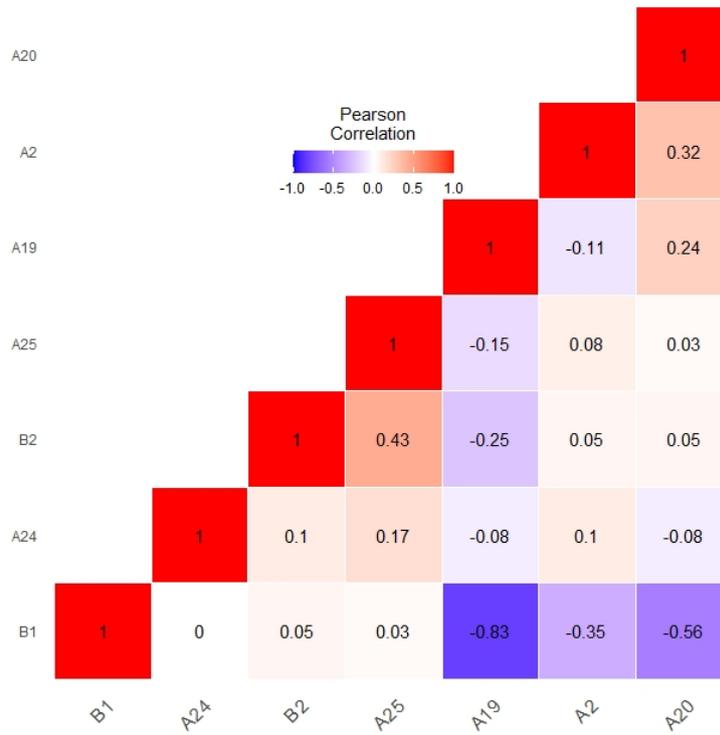
Entre les variables sur la bande 100 à 140 m



Entre les variables sur la bande 140 à 200 m

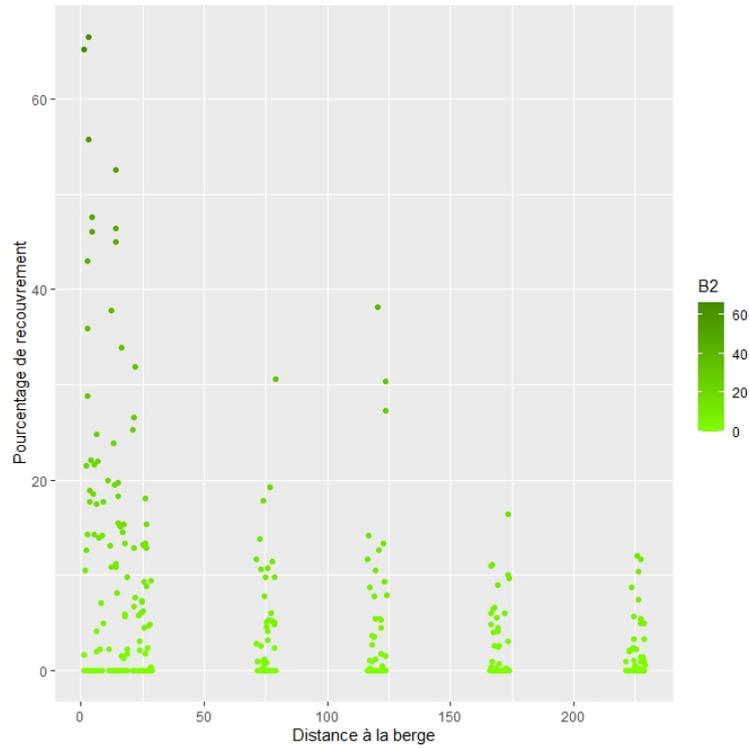


Entre les variables sur la bande 200 à 240 m

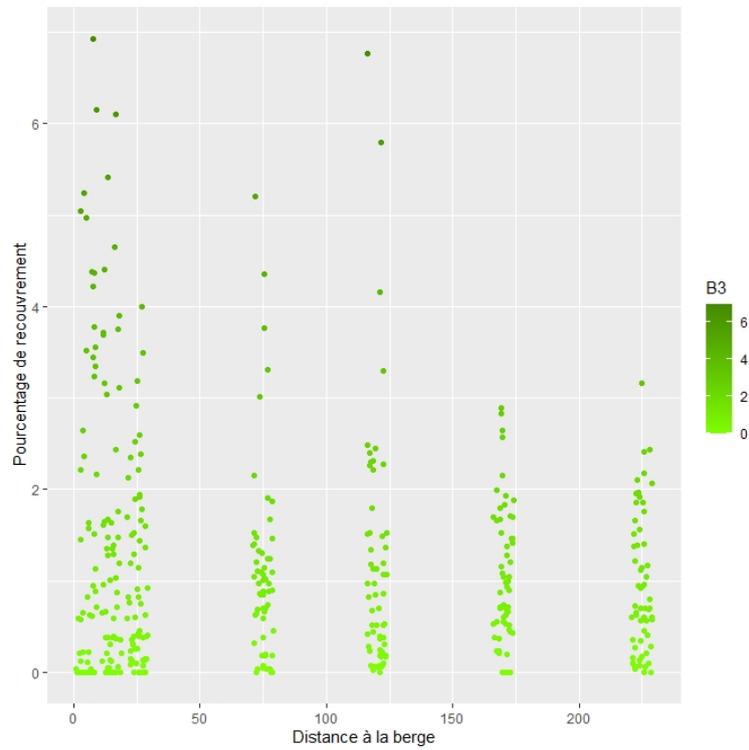


Annexe 6 : Valeurs des variables d'occupation des sols et des pentes

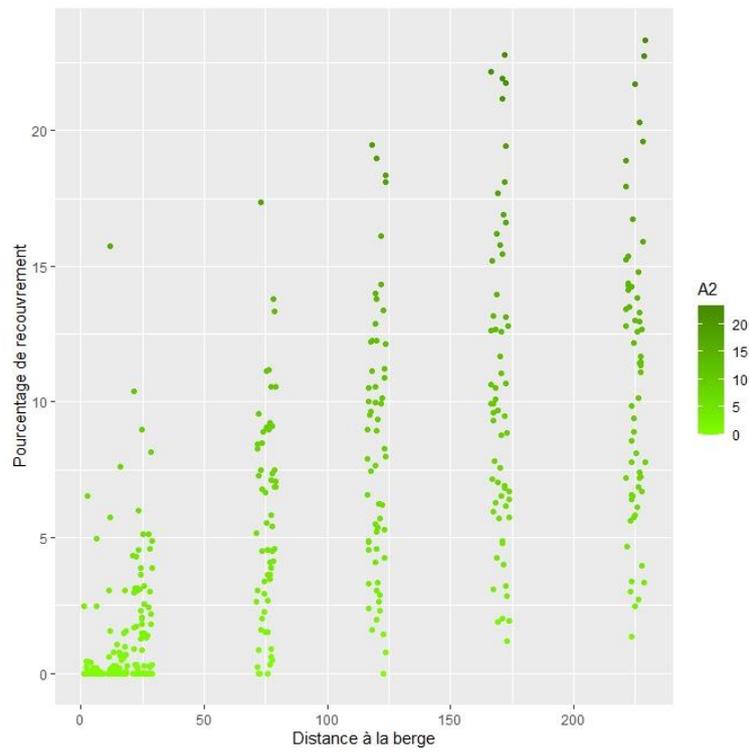
Les surfaces en feuillus



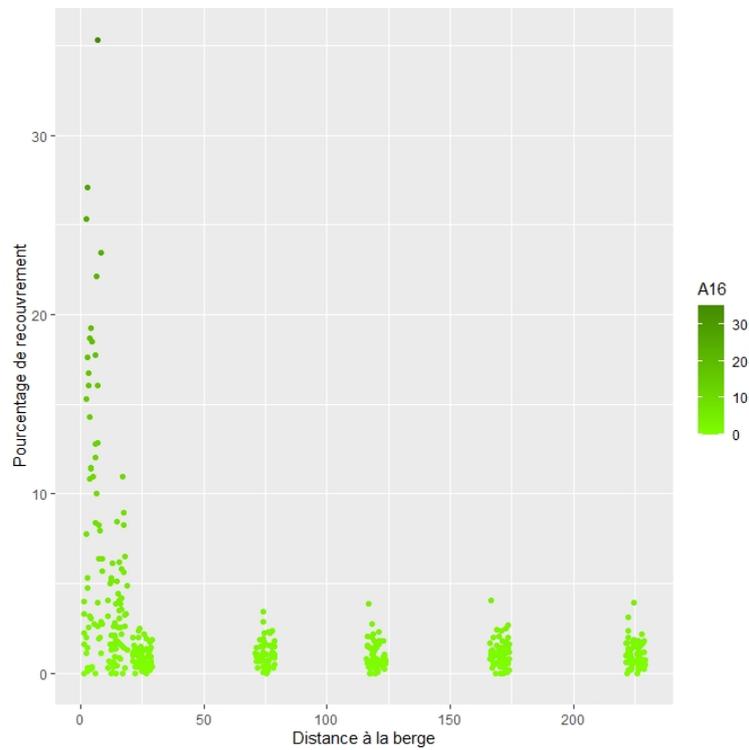
Les Forêts indéterminées



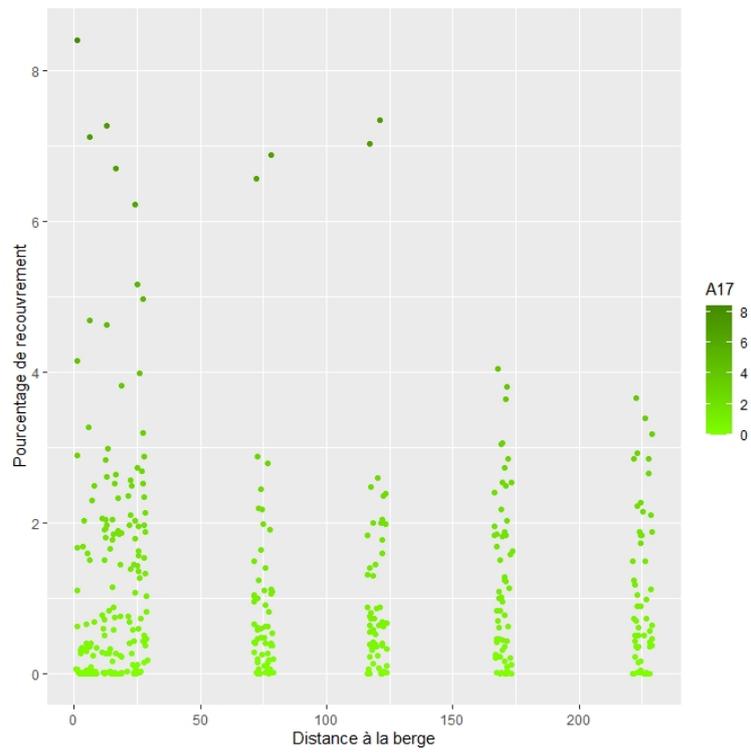
Les cultures



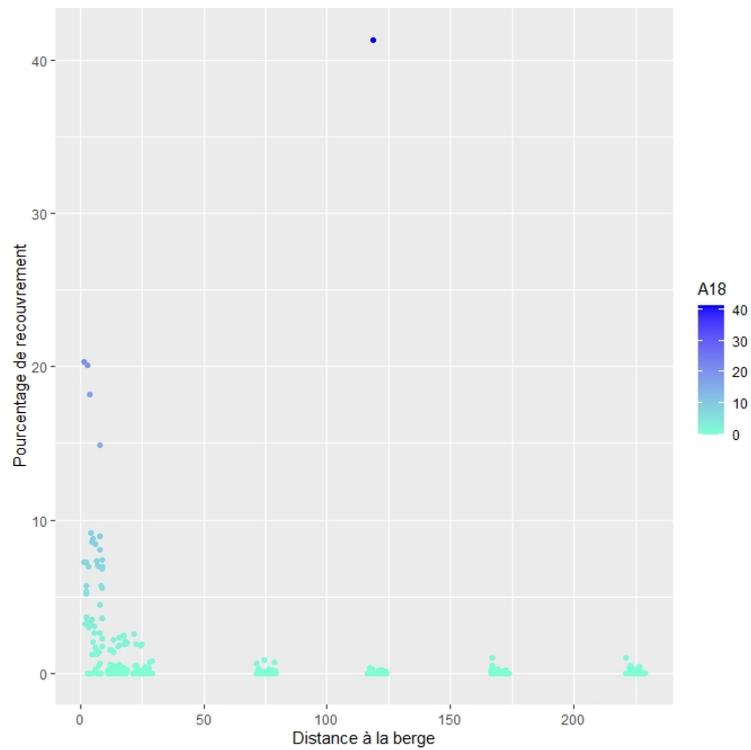
Les haies



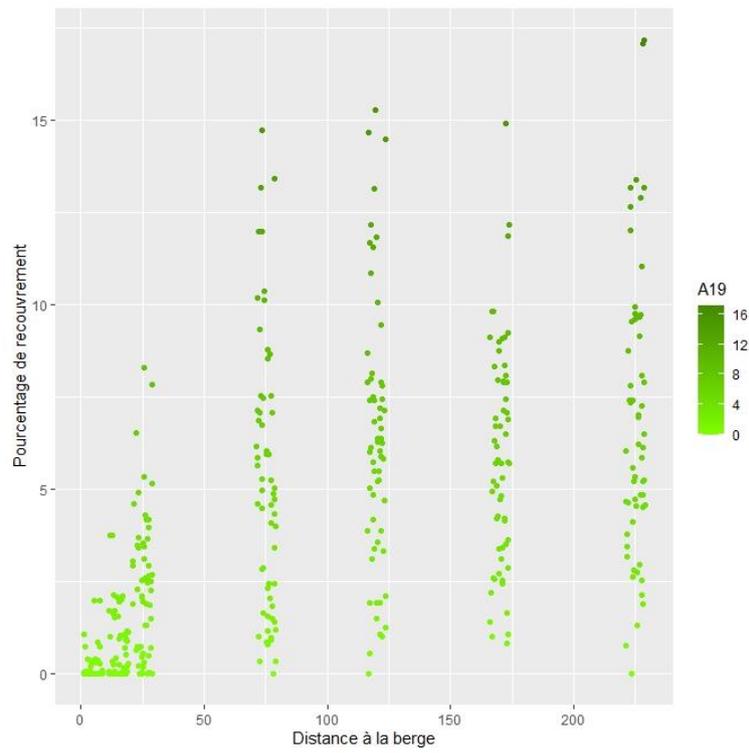
Les landes



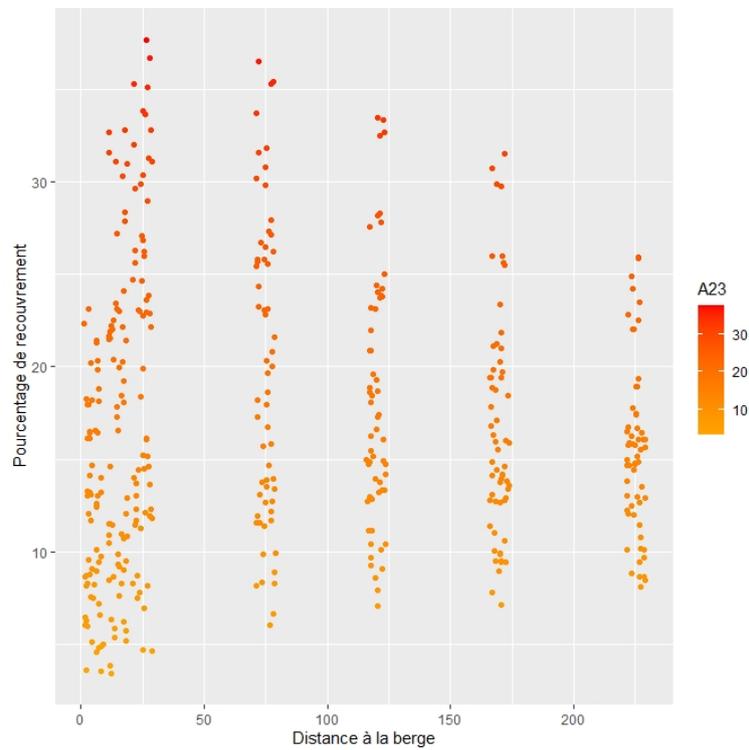
Les milieux aquatiques



Les prairies temporaires



Les pentes moyennes



Les pentes minimales

