

*Étude exploratoire des interactions trophiques entre
phytobenthos et macroinvertébrés sur un cours d'eau
aménagé la Durance, et non aménagé, l'Asse*



Une station d'étude en Durance Gaït Archambaud, 17 mai 2016

Engagement de non-plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages *in extenso*, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

❸ Sanctions

- En cas de manquement à ces consignes, la DEVE ou le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement

Je soussigné (e) __Emma Aubert_____,

reconnais avoir lu et m'engage à respecter l'engagement de non-plagiat.

À __Le Barcarès__ le __27/09/2019__.

Signature :



Mémoire de fin d'étude – ingénieur ENGEES

Spécialité : Gestion des Milieux Naturels – AgroParisTech Nancy

Étude exploratoire des interactions trophiques entre phytobenthos et macroinvertébrés sur un cours d'eau aménagé la Durance, et non aménagé, l'Asse

Auteur : Emma Aubert

Mots clés : cours d'eau, hydroélectricité, interaction trophique, macroinvertébrés, phytobenthos, tubes digestifs

Stage assistant ingénieur ☐

Dominante d'approfondissement ☒

CEI ☐

Autre ☐

Date de fin de rédaction : Octobre 2019

Caractéristiques : 79 pages ; 47 figures ; 10 annexes

Organisme d'accueil : IRSTEA Aix – en – Provence

Nom du maître de stage : Gaït Archambaud, Stéphanie Fayolle, Leah Bêche

Fonctions dans l'organisme : Etablissement public à caractère scientifique et technologique

Nom du référent AgroParisTech : Philippe Durand

Nom du référent ENGEES : Jean-Nicolas Beisel

Résumé :

La littérature scientifique décrit l'importance de l'hydrologie sur les communautés de phytobenthos et de macroinvertébrés et la nature de leurs interactions. Les objectifs de ce stage sont de développer une approche pour évaluer les interactions trophiques phytobenthos et macroinvertébrés en moyenne Durance.

La Durance est un cours d'eau aménagé pour des besoins de production hydroélectrique. L'étude DREAM dans laquelle s'inscrit mon stage s'interroge sur l'effet des mesures de gestion (lâchers d'eau claire, débit réservé) sur la dynamique des communautés biologiques.

Ce sujet exploratoire est focalisé sur la mise en place et la réalisation d'un protocole d'analyse des contenus de tubes digestifs de macroinvertébrés et la comparaison de leur régime alimentaire avec la disponibilité du phytobenthos dans le milieu. Les conclusions mettent en évidence les perspectives de ce type d'étude et les possibles adaptations des modalités de gestions hydraulique.

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE.....	5
LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES FIGURES.....	5
ANNEXES	8
RESUME.....	9
ABSTRACT	9
REMERCIEMENTS.....	10
I- INTRODUCTION	11
1) Présentation de la problématique	11
2) Un sujet qui s'intègre dans le projet DREAM (Archambaud-Suard et al., 2018)	12
3) Présentation des sites d'étude (d'après Archambaud-Suard et al., 2018).....	13
II- METHODE	17
1) Méthode de mise en place du plan d'échantillonnage d'étude des contenus de tubes digestifs des macroinvertébrés	17
a. Mise en place des critères de choix du plan d'échantillonnage à partir des données à disposition	17
b. Présentation du plan d'échantillonnage des contenus des tubes digestifs	20
2) Définition du phytobenthos et présentation des macroinvertébrés choisis	22
a. Le phytobenthos	22
b. Les macroinvertébrés	24
3) Protocole d'extraction des tubes digestifs	27
4) Protocole d'identification des contenus des tubes digestifs.....	28
5) Présentation des méthodes d'analyse des résultats obtenus	30
a. La transformation de la base de données.....	30
b. Observer les différences entre les contenus de tubes digestifs de l'Asse et de la Durance ...	30
c. Observer la similarité entre contenus algaux de tubes digestifs : utilisation de méthodes d'ordination	31
d. Etude du taux de sélectivité des macroinvertébrés dans leur alimentation	32
e. Comparaison de moyenne : Test de Wilcoxon.....	33
III- PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS POUR OLIGONEURIELLA EN MAI 2016 SUR L'ASSE COURS D'EAU NON AMENAGE ET LA DURANCE COURS D'EAU AMENAGE	34
1) Présentation des similarités entre contenus de tubes digestifs pour une même année et un même taxon, sur un cours d'eau aménagé et non aménagé.....	34
2) Combien de contenus de tubes digestifs sont-nécessaires pour observer une différence entre l'Asse et la Durance : Etude de la variabilité des contenus inter-individus	37

3) Quelle similarité entre les contenus de tubes digestifs trouvées dans l'Asse puis dans la Durance ?	40
4) <i>Oligoneuriella rhenana</i> est-elle sélective dans sa consommation en phytobenthos ?	42
IV- PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS : ETUDE DES CONTENUS SELON LE TAXON, L'ANNEE et LA STATION DE MACROINVERTEBRES	46
1) Similarité des contenus selon la station l'année et le taxon de macroinvertébrés	46
a. Présentation des contenus de tubes digestifs	46
b. Etude des singularités au sein de ces contenus : Analyse Factorielle des Correspondances	49
c. Etude des similitudes entre les contenus des tubes digestifs : analyse en composantes principales (ACP) et analyse de redondances (RDA)	52
2) Les trois Ephéméroptères étudiés sont-ils sélectifs dans leur consommation en phytobenthos ?	54
V- INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS.....	61
1) Les améliorations du protocole d'étude des contenus de tubes digestifs	61
2) Des dissimilarités dans les contenus qui peuvent s'expliquer par le mode de vie des trois Ephéméroptères et l'hydrologie	62
3) Comparaison avec les algues des contenus d'Heptageniidae et Chironomidae (Le Guellec, 2002; Maasri et al., 2010)	64
4) Comparaison avec les études historiques de phytobenthos en Durance (Bi Eau, 2012) ...	64
VI- CONCLUSION ET PERSPECTIVES	65
BIBLIOGRAPHIE	66
ANNEXES	69

GLOSSAIRE

Contenus de tubes digestifs : Ensemble des algues identifiées dans un contenu de tube digestif de macroinvertébré.

Surber : Outil d'échantillonnage des macroinvertébrés aquatiques. La surface d'échantillonnage est constante. Dans cette étude le surber utilisé permet d'échantillonner une surface de 0,1 m², avec un filet de vide de maille de 0,25 mm.



Exemple d'utilisation d'un surber (photographie, Irstea Aix-en-Provence)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Nombre et qualités des contenus de tubes digestifs extraits pour étudier les similarités des contenus entre un cours d'eau aménagé et non aménagé.....	21
Tableau 2: Nombre et qualités des contenus de tubes digestif extraits pour étudier les similarités spatiales et temporelles et inter taxon d'Ephéméroptères	21
Tableau 3: Récapitulatif du comportement alimentaire des macroinvertébrés étudiés, tableau extrait de l'ouvrage de Henri Tachet (Tachet et al., 2015) – plus le chiffre est élevé plus l'affinité est grande (de 0 à 5).....	26
Tableau 4 : Différence de proportions pour GOMP, CYMB et ACHN dans le phytobenthos et dans les contenus de tubes digestifs	43
Tableau 5: Permanova, significativité des effets stations, années et taxons sur les dissimilarités entre contenus de tubes digestifs	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma présentant le contexte de l'étude « interaction trophiques phytobenthos et macroinvertébrés »	13
Figure 2 : Localisation des barrages en Durance (source (Archambaud Suard et al., 2018))	14
Figure 3: Localisation des stations d'études sources (Archambaud Suard et al., 2018)	14
Figure 4 : Evolution de la géomorphologie de la station D0BIS entre 2016 (à gauche) et 2017 (à droite), source (Archambaud Suard et al., 2018).....	15
Figure 5 : Evolution de la géomorphologie de la station ASSE entre 2016 (à gauche) et 2017 (à droite), source (Archambaud Suard et al., 2018)	16
Figure 6 : Méthode d'échantillonnage des macroinvertébrés sur le terrain	17
Figure 7 : Abondances absolues et relatives (en %) des groupes faunistiques présents dans l'ambiance 2 (cumul des 3 échantillons A, B et C soit 0.3 m ² de surface prélevée) pour le mois de mai des années 2015, 2016 et 2017 sur les stations Asse et D0bis.	18

Figure 8 : Abondance des Ephéméroptères de taille supérieure à 5 mm dans chacun des 3 habitats de l'ambiance 2 en mai 2015, 2016 et 2017 dans les deux stations D0BIS et ASSE.	20
Figure 9 : Photographie au microscope inversé d'algues vertes filamenteuses dans un contenu de tube digestif, à gauche Spirogyra et à droite Ulothrix.....	22
Figure 10 : Photographie au microscope inversé d'algues vertes unicellulaires dans un contenu de tube digestif, à gauche Cosmarium et à droite Staurastrum	22
Figure 11 : Photographie au microscope inversé, dans un contenu de tube digestif de Audouinella (Photographie Léa Voisin, Université Saint Jérôme, 2019)	23
Figure 12 : Photographie au microscope inversé de diatomées dans un contenu de tube digestif,	23
Figure 13 : Présentation des caractéristiques morphologiques des Ephéméroptères source (Elliott and Humpesch, 2010).....	24
Figure 14 : Cycle de vie des Ephéméroptères source (Elliott and Humpesch, 2010)	24
Figure 15 : Photographie d'Oligoneuriella –	25
Figure 16 : Photographie de Ephemerella – auteur JP Balmain, Irstea	25
Figure 17 : Photographie de Ecdyonurus – auteur JP Balmain, Irstea	26
Figure 18 : Photographies des premières étapes au laboratoire -a. Sélection des 3 individus à disséquer dans un échantillon -b. Observation et dissection réalisées sous la loupe binoculaire - c. Mesure de la taille de l'individu à disséquer avec l'exemple d'Oligoneuriella	27
Figure 19 : Photographies des différentes étapes de la dissection avec Oligoneuriella rhenana – dissection réalisée par Léa Voisin (auteur Léa Voisin , Irstea)	27
Figure 20 : Contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella	28
Figure 21 :- a. Microscope inversé -b. Chambre de sédimentation -c. Méthode de balayage de la cuve pour la quantification des cellules algales.....	28
Figure 22 : Exemple d'algues trouvées dans les tubes digestifs observation au microscope inversé	29
Figure 23 : Présentation de la composition des contenus de tubes digestifs de 12 Oligoneuriella sur l'Asse et la Durance	34
Figure 24 : Composition de groupes Algues rouges filamenteuses, Algues vertes filamenteuses et Algues vertes unicellulaires.....	35
Figure 25 : Comparaison de la composition des contenus sur l'Asse et la Durance après suppression des fragments de diatomées pour une meilleure visualisation des résultats.....	35
Figure 26 : Histogramme représentant la similarité des contenus inter et intra station.....	37
Figure 27 : Courbe de raréfaction sur l'Asse et la Durance	38
Figure 28 : Variabilité de l'indice de Shannon selon le nombre d'individus étudiées boxplot	39
Figure 29 : ACP en pourcent pour observer les similitudes entre les contenus de tubes digestifs sur l'Asse et la Durance	40
Figure 30 : Comparaison des proportions des groupes d'algues -a. AVF -b.GOMP -c.ACHN -d.CYMB entre les contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella de l'Asse et de la Durance en mai 2016	41
Figure 31 : Présentation du relevé de phytobenthos de 2016 sur ASSE (A) et D0BIS (D) dans les trois ambiances de vitesse en densité cellulaire et abondance relative.....	42

Figure 32 : Comparaison des abondances relatives en algues entre ASSE (A) et D0BIS (D) dans le relevé de phytobenthos et dans les contenus	43
Figure 33 : Calcul de l'Indice de Strauss pour les principale algues présentes dans les contenus pour Oligoneuriella en Mai 2016, les lignes rouge représentent la valeur + 0.01 et -0.01	44
Figure 34 : Présentation des contenus de tubes digestifs étudiés	47
Figure 35 : Présentation des contenus de tubes digestifs par station selon l'année et le taxon	47
Figure 36 : Composition des groupes Algues rouges filamenteuses (ARF), Algues vertes filamenteuses (AVF) et Algues vertes unicellulaires (AVU) présents dans le cumul des contenus de tubes digestifs	48
Figure 37 : Analyse Factorielle des Correspondances : projection sur les dimensions 1,2 et 3	50
Figure 38 : Visualisation des effets, taxon, station et année dans la structure des contenus de tubes digestifs	51
Figure 39 : Résultat de l'ACP, visualisation des résultats en affichant les barycentres des variables station, année et taxon	52
Figure 40 : A gauche : représentation des centroïdes des variables environnementales explicatives sur les axes 1 et 2 de la RDA ; A droite : représentation des variables quantitatives structurant les contenus de tubes digestifs après réalisation de l'ACP	53
Figure 41 : Abondance relative des groupes d'algues ACHN, GOMP, COCC et CYMB dans le relevé de phytobenthos.....	54
Figure 42 : Abondance relative des algues des relevés de phytobenthos en 2015, 2016 et 2017 sur ASSE et D0BIS dans les trois ambiances de vitesse en densité cellulaire et abondance relative	55
Figure 43 : Calcul de l'indice de Strauss selon le taxon de macroinvertébrés.....	56
Figure 44 : Calcul de l'indice de Strauss selon la station pour Ecdyonurus, Ephemerella et Oligoneuriella.....	57
Figure 45 : Calcul de l'indice de Strauss selon l'année pour Ecdyonurus, Ephemerella et Oligoneuriella	58
Figure 46 : Indice de Strauss selon l'année et la station	59
Figure 47 : Abondance relative du groupe AVF dans les contenus des trois Ephéméroptères	60

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation des abréviations des groupes d'algues

Annexe 2 : Article de loi sur les débits réservés

Annexe 3 : Évolution des débits horaires moyen sur l'Asse et la Durance

Annexe 4 : ACP illustrant les variables déterminant les habitats retrouvés dans l'étude DREAM (Corse, 2018)

Annexe 5 : Présentation des abondances et des occurrences des 24 contenus d'Oligoneuriella de Mai 2016 sur l'Asse et la Durance

Annexe 6 : Abondance du phytobenthos sur l'Asse et la Durance en Mai 2016

Annexe 7 : Présentation de l'Indice de Strauss calculé pour l'ensemble des algues pour l'étude des 24 Oligoneuriella en Mai 2016

Annexe 8 : Présentation du total des abondances et des occurrences des 53 contenus étudiés pour l'analyse des effets station, année et taxon

Annexe 9 : Présentation des densités cellulaires du phytobenthos sur la l'Asse et la Durance en Mai 2015, 2016 et 2017

Annexe 10 : Présentation de l'Indice de Strauss calculé pour l'ensemble des algues pour l'étude sur le jeu de données comprenant trois années, deux stations et trois taxons

RÉSUMÉ

La littérature scientifique décrit conjointement l'importance de l'hydrologie sur la structure des communautés de phytobenthos et de macroinvertébrés et la nature et la complexité de leurs interactions. Les objectifs de ce stage sont de développer une approche pour évaluer les interactions trophiques phytobenthos et macroinvertébrés sur l'ASSE et la moyenne Durance.

La Durance est un cours d'eau aménagé qui répond à des besoins de production hydroélectrique, agricole et d'alimentation en eau. L'étude DREAM dans laquelle s'inscrit mon stage s'interroge sur l'effet des mesures de gestion (lâchers d'eau claire, débit réservé) sur la dynamique des communautés biologiques.

Ce sujet exploratoire est focalisé sur la mise en place et la réalisation d'un protocole d'analyse des contenus de tubes digestifs de macroinvertébrés et la comparaison de leur régime alimentaire avec la disponibilité du phytobenthos dans le milieu.

Les résultats montrent une proportion plus grande de diatomées telles que *Achnanthes** dans les contenus en Durance et de *Cymbella*** sur l'Asse. Ces différences s'observent aussi dans le relevé de phytobenthos mais sont à nuancer selon l'année et le macroinvertébré étudié. De plus les larves d'Ephéméroptères semblent sélectionner certaines algues et ne pas en consommer d'autres.

Les conclusions mettent en évidence les perspectives de ce type d'étude et les possibles adaptations des modalités de gestions hydrauliques.

ABSTRACT

Scientific literature describes jointly the importance of hydrology in the structure of phytobenthos and macroinvertebrate communities and the origin of the complexity of their interactions. The purpose of this internship is to develop a method to study trophic interactions between phytobenthos and macroinvertebrate in : the medium Durance and the Asse rivers.

The Durance is a develop watercourse which answers hydroelectricity production and agricultural needs and water supply. My internship is a continuation of the DREAM study which questions the impact of the management measures (water releases, instream flows) on the biological communities.

This exploratory subject is focused on the elaboration and implementation of an analysis protocol of the gut contents of macroinvertebrate and the comparison of their diet with the phytobenthos availability in the river.

Results show a greater proportion of *Achnanthes** in the contents of Durance and of *Cymbella*** in the contents of Asse. There are also disparities in the list of phytobenthos which should be qualified according to the year and the macroinvertebrate studied. Moreover, larvae of mayflies seem to select specific algae and to not consume others.

The conclusions highlight the perspectives of this type of study and the possible adaptations regarding the hydrolic management terms.

**Achnanthes* – *Achnantheidium* (Diatomées)

***Cymbella* - *Encyonema* - *Cymbopleura*- *Amphora* (Diatomées)

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier mes trois encadrantes à l'Irstea, l'IMBE et Edf.

Gaït Archambaud pour m'avoir encadrée et permis de réaliser ce stage à l'Irstea d'Aix-en-Provence.

Stéphanie Fayolle qui m'a encadrée tout au long du stage, aidée et formée à la détermination des algues et accueillie pendant plusieurs jours à l'IMBE (Institut Méditerranéen de la Biodiversité et d'Ecologie) de la faculté des Sciences de Saint-Jérôme à Marseille, ainsi que l'ensemble de l'équipe IMBE pour son accueil lors de mes nombreux passages dans leur laboratoire.

Leah Bêche pour les pertinents conseils fournis aux différents stades de mon stage.

Je remercie particulièrement Léa Voisin, avec qui j'ai pu partager de nombreux aller-retour à Marseille, pour son aide efficace et rigoureuse, ainsi que ses précieux conseils au laboratoire lors de la dissection des macroinvertébrés et du comptage des algues au microscope.

Je remercie également Maxime Logez et Marie Hélène Lizée qui m'ont accordé une partie de leur temps pour m'aider et me conseiller lors de l'étape d'analyse de données, tout comme Paul Miguet et Vincent Roubeix qui m'ont fait part de leurs idées et conseils pendant certaines étapes de mon stage.

Je remercie l'ensemble de l'équipe FRESCO pour son accueil et sa bonne humeur qui donne envie d'aller travailler.

Merci également à mes encadrants ENGEES et AgroParisTech, Jean-Nicolas Beisel et Philippe Durand pour leurs nombreux conseils.

I- INTRODUCTION

1) Présentation de la problématique

La littérature scientifique décrit l'impact de l'hydrologie sur la structure du phytobenthos (Fayolle et al., 1999) et des macroinvertébrés (Corse, 2018). De nombreuses études mettent en évidence les interactions entre ces communautés aquatiques. M. Gwenolle Le Guellec, stagiaire à l'IRSTEA a travaillé sur la « Comparaison des assemblages diatomiques présents dans les tubes digestifs des Ephéméroptères Heptageniidae, avec ceux prélevés sur le substrat de manière standardisée (Norme IBD) » (Le Guellec, 2002), un travail qui pose des bases bibliographiques sur les interactions entre phytobenthos et macroinvertébrés. Les références scientifiques montrent que l'abondance et la structure des communautés algales d'un cours d'eau est corrélée à la présence de macroinvertébrés herbivores (Poff et al., 2003). En effet des modifications des algues soumises aux macroinvertébrés sont observées (Hillebrand, 2009; Wellnitz and Ward, 1998) : changement du taux de croissance, modification du mode de fixation et de la distribution sur le substrat (Pan and Lowe, 1994). A l'inverse, il est montré que les diatomées influencent l'abondance des macroinvertébrés (Fuller et al., 1986). Ayant la capacité de percevoir l'hétérogénéité spatiale de la nourriture, ces insectes aquatiques se déplacent dans les zones où le peuplement diatomique est plus dense (Allan, 1995 ; Le Guellec, 2002). Par la suite la qualité de ces interactions est variable selon l'environnement et notamment la vitesse du courant (Allan, 1995; Poff et al., 2003). L'ensemble de ces travaux sont la preuve de l'existence de relations entre les algues et les macroinvertébrés. Dans le cadre de ce rapport de stage, la relation trophique est étudiée.

Les objectifs sont de développer une approche pour évaluer les interactions trophiques entre phytobenthos et macroinvertébrés en moyenne Durance. Ce sujet exploratoire est focalisé sur **la mise en place et la réalisation d'un protocole d'analyse des contenus de tubes digestifs de macroinvertébrés** et la comparaison de leur régime alimentaire avec la disponibilité du phytobenthos dans le milieu. L'étude se présente en trois grandes questions :

- *Quelle est la variabilité dans les interactions trophiques phytobenthos et macroinvertébrés pour un taxon à une date donnée ?*
- *Quelles sont les différences et similitudes spatiales et temporelles dans les contenus des tubes digestifs des différents taxons et comment les expliquer ?*
- *Les macroinvertébrés étudiés sont-ils sélectifs dans leur consommation en phytobenthos ?*

L'analyse des interactions trophiques dans les écosystèmes est importante pour mieux comprendre les comportements des communautés biologiques d'un milieu. La compréhension de ces interactions, dans des milieux naturels changeants (Maasri et al., 2010), permet d'identifier et comprendre les sources de déséquilibre des milieux, et ainsi mettre en place des solutions de gestion durable.

Les recherches bibliographiques sur la structure des communautés algales dans les tubes digestifs des macroinvertébrés sont rares. Le guide des macroinvertébrés (Tachet et al., 2015) renseigne sur les traits biologiques de ces individus d'eau douce. Dans cet ouvrage le mode d'alimentation et le type de nourriture sont caractérisés. Cependant ces informations, en ce qui concerne les algues s'arrêtent au niveau de détermination « macrophytes vivants » et « microphytes vivants ». Des groupes fonctionnels indiquant le mode d'alimentation des macroinvertébrés sont définis, notamment par l'étude de leurs pièces buccales. Ils peuvent être racleurs, brouteurs, filtreurs, prédateurs, perceurs, parasites, mangeurs de sédiments fins et absorbeurs à travers les téguments (Tachet et al., 2015).

Ces groupes fonctionnels peuvent être critiqués. En effet l'appartenance des macroinvertébrés à un groupe fonctionnel est variable selon son stade biologique, la saison et la localisation. Il y a une variation du régime alimentaire des macroinvertébrés dans le temps et l'espace. Ainsi assigner un

invertébré à un groupe fonctionnel est source d'erreurs. Il est recommandé aux chercheurs, de considérer les macroinvertébrés comme omnivores, sauf si des données locales indiquent le contraire ou que les macroinvertébrés ont des traits morphologiques, comme les pièces buccales sanctionnant leur régime alimentaire (Tierno de Figueroa et al., 2019). Une étude réalisée sur les larves de chironomes (Maasri et al., 2010) regarde les similitudes entre les contenus des tubes digestifs de ces macroinvertébrés en algues (algues vertes, algues rouges, cyanobactéries et diatomées). Une préférence des chironomes pour les Cyanophyceae et les Chlorophyceae est mise en évidence.

La littérature montre différentes méthodes et résultats pour l'étude du régime alimentaire des macroinvertébrés. Des conclusions qui diffèrent selon les taxons de macroinvertébrés, le niveau taxonomique d'étude, la saison et les caractéristiques physiques du cours d'eau étudié. D'où l'importance de réaliser une étude du régime alimentaire des macroinvertébrés. Ainsi, ce stage est une étude pilote, qui a pour objectif de sortir les grands axes de l'étude des interactions entre algues et macroinvertébrés dans des cours d'eau soumis à des régimes hydrologiques différents. Les résultats obtenus permettront de dégager les grandes tendances de cette première étude. Ce travail se divise en deux grandes parties : **-1. la mise en place et la réalisation d'un protocole d'étude des contenus de tubes digestifs -2. l'analyse des données obtenues.**

2) Un sujet qui s'intègre dans le projet DREAM (Archambaud-Suard et al., 2018)

- *Le contexte réglementaire*

Ce suivi vise à répondre aux attentes du code de l'environnement mentionnées dans l'article L214-18 modifié le 30 décembre 2006 par la Loi n°2006-1772 sur l'eau et les milieux aquatiques, Annexe 2, « Tout ouvrage à construire dans le lit d'un cours d'eau doit comporter des dispositifs maintenant dans ce lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux au moment de l'installation de l'ouvrage ainsi que, le cas échéant, des dispositifs empêchant la pénétration du poisson dans les canaux d'amenée et de fuite » (*Code de l'environnement - Article L214-18, n.d.*). Cet article de loi établit les critères permettant de calculer les débits réservés imposés en aval des retenues d'eau.

- *Les régimes réservés en moyenne Durance*

Depuis janvier 2014, en complément d'une augmentation des débits réservés imposés par la réglementation en moyenne Durance, une variation du débit selon la saison est appliquée. En été il est de un quatorzième du module (débit hydrologique moyen inter-annuel du cours d'eau) et en hiver il s'élève à un vingtième du module. Historiquement, l'évaluation de ces mesures de gestion hydraulique sur les communautés biologiques est réalisée en moyenne Durance à proximité de la commune de Sainte Tulle. Ces recherches mettent en évidence une problématique de colmatage limoneux des substrats. Cette perturbation de la fonctionnalité des substrats impacte le fonctionnement des compartiments biologiques d'un milieu aquatique. Ainsi afin d'améliorer la qualité de l'eau de la moyenne Durance, des lâchers d'eau claire sont réalisés au niveau du barrage de l'Escale. L'impact de ces différents modes de gestion hydraulique est étudié dans le projet DREAM précédemment évoqué.

Le tronçon Escalade – Cadarache est soumis à des crues morphogènes ce qui complexifie l'analyse de l'efficacité de ces lâchers sur la dynamique des communautés d'algues et de macroinvertébrés. Cependant l'ensemble des données collectées lors de cette étude permet d'étudier les corrélations entre hydrologie et dynamique des algues et macroinvertébrés.

- *Le projet DREAM*

Ce stage s'inscrit dans la continuité de l'étude DREAM (Dynamique de Recolonisation des Algues et des Macroinvertébrés en Durance). Ce projet est mené par l'Irstea laboratoire de recherche public et EDF gestionnaire des ouvrages hydroélectriques en moyenne Durance, en partenariat depuis 2014 avec un co-financement de l'Agence de l'eau Rhône-Alpes-Méditerranée. L'étude du phytobenthos est confié au bureau d'étude Bi-Eau. Les objectifs de cette étude sont d'évaluer l'effet des mesures de gestion, lâchers d'eau claire et débits réservés avec modulation saisonnière, sur la dynamique printanière des communautés biologiques, phytobenthos et macroinvertébrés, en moyenne Durance entre les barrages de l'Escale et de Cadarache Figure 1.

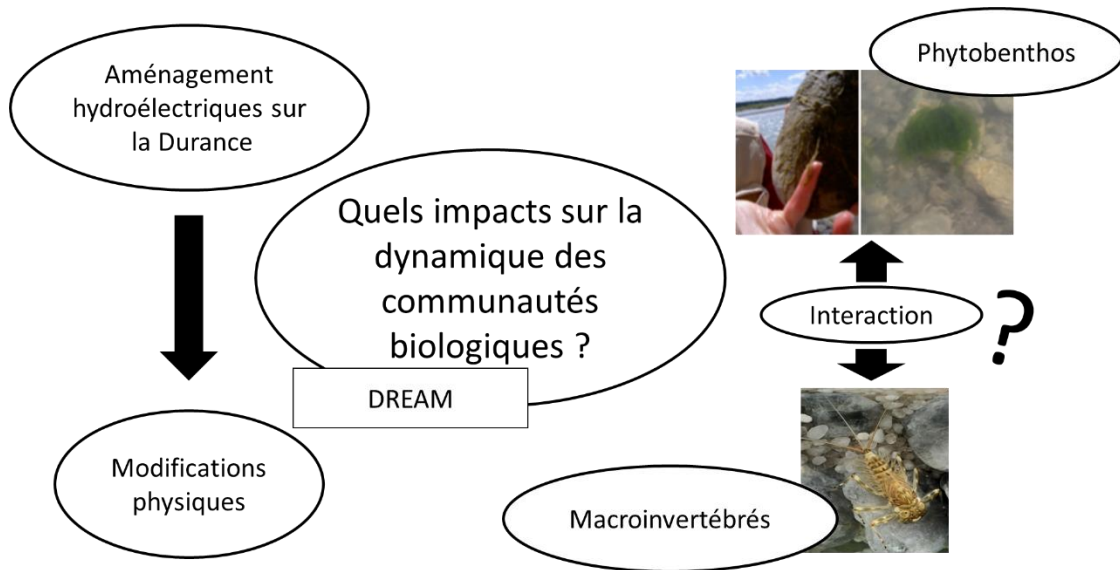


Figure 1 : Schéma présentant le contexte de l'étude « interaction trophiques phytobenthos et macroinvertébrés » - source photographie : Irstea

3) Présentation des sites d'étude (d'après Archambaud-Suard et al., 2018)

- *La Durance*

La Durance prend ses sources vers 2 300 mètres d'altitude sur la commune de Montgenèvre. Les sources sont localisées au niveau des Près du Gondran sur un versant du Sommet des Anges et se jettent en rive gauche du Rhône ("Géoportail," n.d.). Depuis le XX^e siècle, le cours est aménagé pour des besoins de production hydroélectrique, d'irrigation agricole et d'alimentation en eau. Aujourd'hui sept retenues d'eau sont présentes en Durance (Archambaud-Suard et al., 2018), Figure 2. La Durance se caractérise par une géomorphologie en tresses avec des tronçons de morphologie très variable selon les années en lien avec les fréquentes crues morphogènes.

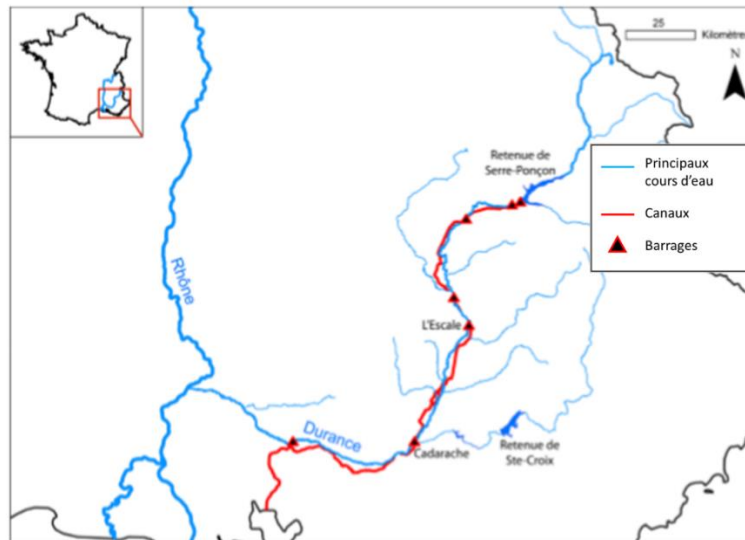


Figure 2 : Localisation des barrages en Durance - source (Archambaud-Suard et al., 2018)

- Localisation, caractéristiques morphologiques et hydrologie

Les sites d'étude de ce stage sont les mêmes que ceux utilisés dans l'étude DREAM. En effet l'ensemble des données de terrain utilisées pour ce stage sont issues d'une partie de celles récoltées par cette étude sur la période 2015 – 2017. L'année 2014 a été mise de côté car les prélèvements de phytobenthos n'ont pas été réalisés sur l'Asse.

Pour faciliter la lecture et la comparaison avec les rapports de l'étude DREAM et historiquement les recherches sur le secteur de Sainte Tulle, le codage des stations est gardé. Ainsi, les deux stations d'étude en moyenne Durance sont **D0BIS** en amont de la confluence avec l'Asse et D1 en aval. La station sur l'Asse est notée **ASSE**, Figure 3. Dans le cadre du stage, l'interaction trophique phytobenthos et macroinvertébrés est étudiée en D0BIS et ASSE.

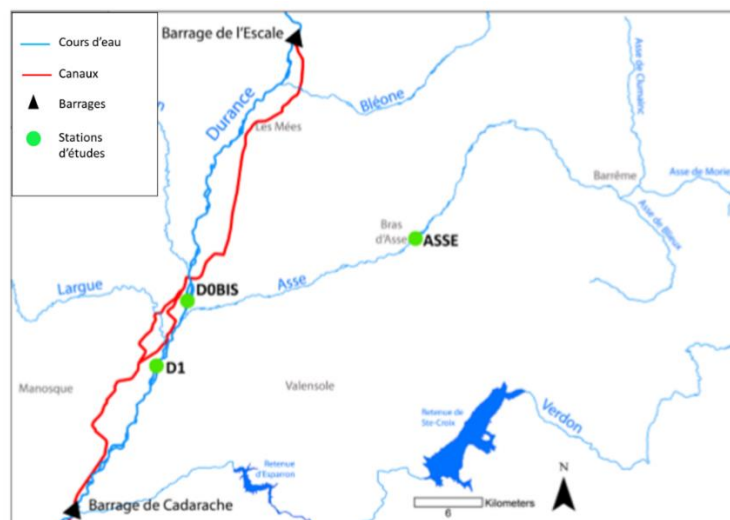


Figure 3: Localisation des stations d'études - sources (Archambaud-Suard et al., 2018)

La station D0BIS est située à plus de 26 km en aval du barrage de l'Escale et à 1,8 km en amont de la confluence de l'Asse. La station ASSE est localisée sur la commune de Bras d'Asse. En 2015 deux chenaux étaient présents. Selon les années, en période de hautes eaux, trois chenaux peuvent être visibles.

Ces stations sont représentatives d'habitats lotiques. Les prélèvements de macroinvertébrés et de phytobenthos sont effectués à une vitesse de surface supérieure à 30 cm/s et de préférence dans un faciès hydromorphologique de type radier.

Les granulométries représentatives de ces stations sont : pierres fines ou pierres grossières. Cependant l'Asse est caractérisée par un substrat moins grossier et un développement végétal moins important que la Durance. Selon les années des cailloux grossiers et blocs sont échantillonnés (Archambaud-Suard et al., 2018).

- *Présentation de la station D0BIS sur la période 2015 - 2017*

Les coordonnées de la station sont longitude 5,88408055 et latitude 43,8882083, avec une altitude d'environ 327 mètres. La longueur de la station est comprise entre 35 et 60 mètres et la largeur du lit mouillé de 30 à 100 mètres.

D0BIS se caractérise par une géomorphologie constituée d'un chenal unique en 2015 et 2016. A la fin de l'année 2016 une crue morphogène est responsable de la transformation de la géomorphologie de la station, le chenal unique se sépare en deux bras distincts, Figure 4.



Figure 4 : Evolution de la géomorphologie de la station D0BIS entre 2016 (à gauche) et 2017 (à droite) – source (Archambaud-Suard et al., 2018)

- *Présentation de la station ASSE sur la période 2015 – 2017*

Les coordonnées de la station sont longitude 6,13918888 et latitude 43,9298889, avec une altitude d'environ 483 mètres. La longueur de la station est comprise entre 50 et 100 mètres et la largeur du lit mouillé de 5 à 20 mètres.

ASSE a une géomorphologie composée de plusieurs bras en 2015, jusqu'à trois pendant les périodes de hautes eaux en hiver. Selon la saison deux bras peuvent être asséchés et un en eau. C'est le cas en juillet 2015. En 2016 un chenal unique est présent et en 2017 les différents chenaux d'une rivière en tresse sont présent, Figure 5.



Figure 5 : Evolution de la géomorphologie de la station ASSE entre 2016 (à gauche) et 2017 (à droite) – source (Archambaud-Suard et al., 2018)

- *Hydrologie et choix de gestion hydraulique*

Les années considérées dans cette étude sont 2015, 2016 et 2017.

Globalement **ASSE** est caractérisée par un débit instable corrélé aux **événements pluvieux et de sécheresse naturels**. Le niveau d'eau sera plus haut en hiver. A l'approche de la saison estivale, selon les années, certains bras sont asséchés.

En plus des variations saisonnières, **D0BIS** est soumise à différents modes de **gestion hydraulique** :

- Le **débit réservé** en aval du barrage de l'Escale est de 6,1 m³/s du 1 octobre au 31 mars et de 8,7 m³/s du 1^{er} avril au 30 septembre.
- Les **lâchers d'eau claire** ont lieu entre février et mi-mars 2016 et 2017. Les lâchers sont d'une durée totale de 10 heures avec un débit maximal de 70 m³/s.

Les crues intervenues entre 2014 et 2017 impactent fortement l'hydrologie de **ASSE** et **D0BIS**. En janvier 2014 s'est produite une crue de période retour 10 ans. En aval de l'Escale le débit horaire moyen peut aller jusqu'à 1 200 m³/s. Cette crue peut avoir un effet sur les résultats obtenus en 2015. L'année 2015 se caractérise par une grande stabilité malgré une crue légère en juin ; la crue automnale est réduite, avec un débit horaire moyen inférieur à 60 m³/s Annexe 3. L'année 2016 montre également une grande stabilité jusqu'en novembre où il y a une crue morphogène avec un débit horaire moyen pouvant aller jusqu'à 1 200 m³/s ce qui pourra expliquer les résultats obtenus en 2017 (Archambaud-Suard et al., 2018).

En résumé, les années 2015 et 2017 se ressemblent par le fait qu'elles sont toutes les deux soumises à l'effet d'une crue automnale de l'année précédente, avec une nuance pour 2017 qui se caractérise par une crue de très forte intensité qui a de plus provoqué des changements géomorphologiques dans les stations.

La Durance se distingue de l'Asse par une grande stabilité des débits liée au régime réservé en dehors des pics de crues et des lâchers d'eau claire de février 2016 et 2017.

L'ensemble de ces informations et les résultats obtenus lors de l'étude DREAM depuis 2014 expliquent la mise en place d'une **méthode d'étude des contenus de tubes digestifs sur l'Asse et la Durance**. Celle-ci se divise en trois grande parties : -1. la présentation des données à disposition -2. la présentation des méthodes d'extraction des tubes digestifs et d'identification des algues des contenus - 3. les techniques utilisées pour analyser les données obtenus.

II- METHODE

1) Méthode de mise en place du plan d'échantillonnage d'étude des contenus de tubes digestifs des macroinvertébrés

a. Mise en place des critères de choix du plan d'échantillonnage à partir des données à disposition

- Les macroinvertébrés à disposition pour l'étude des contenus de tubes digestifs :

Les macroinvertébrés ont été prélevés depuis 2015 au cours de différentes campagnes mensuelles sur les deux stations précédemment présentées. L'échantillonnage des macroinvertébrés sur le terrain se fait pour une station, comme indiqué sur la Figure 6. Ce sont parmi ces macroinvertébrés échantillonnés que les individus à disséquer sont sélectionnés. Les macroinvertébrés sont fixés au formaldéhyde (à 5%) sur le terrain, puis conservés au laboratoire dans l'éthanol (à 70%), après les phases de tri et d'identification, réalisées par Irstea.

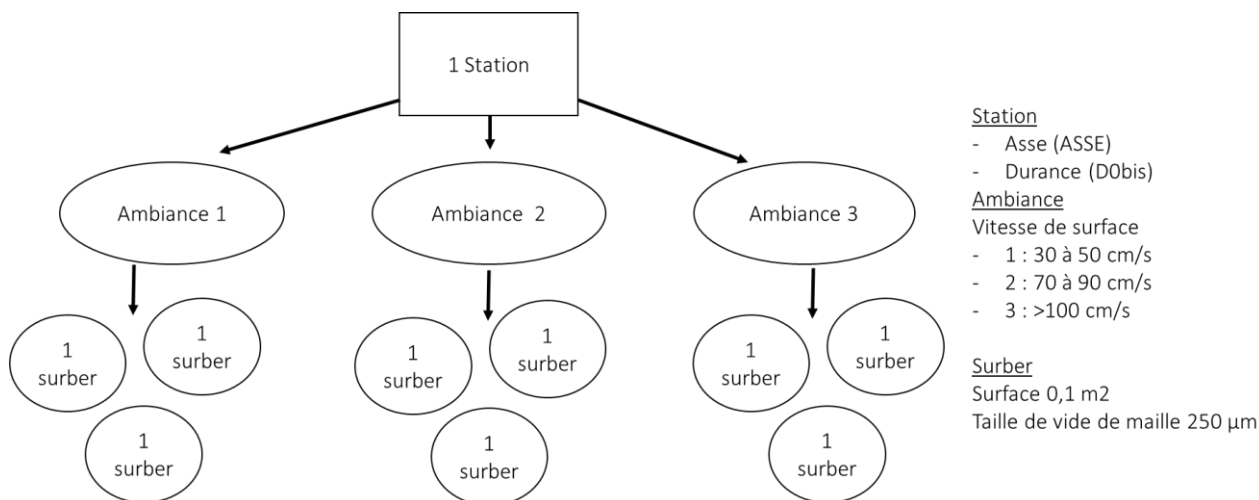


Figure 6 : Méthode d'échantillonnage des macroinvertébrés sur le terrain

Les ambiances représentent la diversité des écoulements de surface de la rivière étudiée. Les granulométries présentes dans chacune des ambiances sont relativement homogènes et représentatives de celles présentes dans les stations d'étude. Chacun des surbers (A, B et C) réalisés correspond à un habitat, qui est décrit selon sa granulométrie, la stabilité des éléments qui le composent, l'importance de la végétation aquatique, le degré de développement du biofilm, la présence de dépôts (limon, débris végétaux), la hauteur d'eau totale, la vitesse du courant à 3 cm du fond, les vitesses de courant à 0.2, 0.4 et 0.8 fois la hauteur d'eau et l'estimation visuelle du colmatage.

L'habitat est une variable importante dans la diversité des communautés biologiques d'un milieu. Emmanuel Corse (Corse, 2018) étudie la variabilité des habitats selon la campagne, l'ambiance, la station et l'année Annexe 4. Les analyses effectuées montrent que les habitats sont variables selon la campagne et l'ambiance ; une variabilité des habitats selon l'année et la station d'étude sont aussi significatifs.

Les variables d'habitats qui structurent ces variations selon la campagne sont : la température, le développement végétal, les niveaux de colmatage et le recouvrement de la végétation. La variabilité des habitats selon l'ambiance est structurée par les variables de vitesse (vitesse moyenne dans la colonne d'eau, vitesse maximale, vitesse à 3 cm) en association avec le colmatage minéral. La variabilité des habitats selon la station est liée à des substrats moins grossiers et un développement végétal moindre sur l'Asse que sur la Durance (Corse, 2018). L'ambiance 2 est la plus représentative de l'abondance et la diversité des stations **ASSE** et **D0BIS** (*comm pers.* Archambaud Gaït). Les abondances absolues et relatives des macroinvertébrés disponibles rassemblés en groupes faunistiques dans les échantillons de l'**ambiance 2** sur les stations **ASSE** et **D0BIS** au mois de **mai 2015, 2016 et 2017** sont présentées Figure 7.

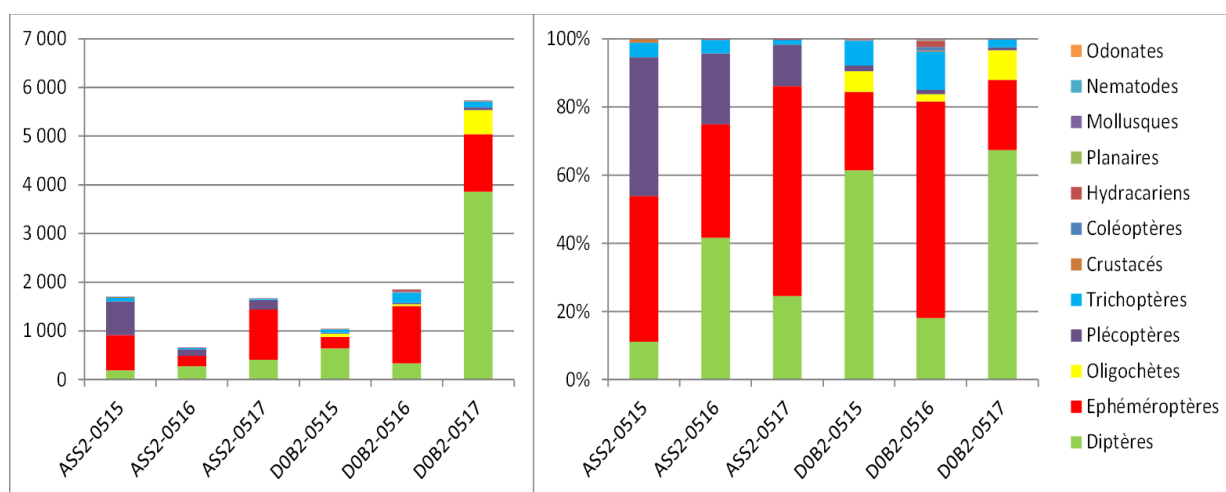


Figure 7 : Abondances absolues (individus/0.9m²) et relatives (en %) des groupes faunistiques présents dans l'ambiance 2 (cumul des 3 échantillons A, B et C soit 0.3 m² de surface prélevée) pour le mois de mai des années 2015, 2016 et 2017 sur les stations Asse et D0bis.

Les communautés d'invertébrés de l'Asse et de la Durance diffèrent : ASSE se distingue de la Durance par l'abondance de Plécoptères tandis que D0BIS se discrimine par l'abondance des Trichoptères et Oligochètes. Toutefois les deux groupes de macroinvertébrés dominants pour les deux stations et les trois années sont les Ephéméroptères et le Diptères. Dans le cadre du stage, il a été choisi de s'intéresser aux Ephéméroptères. Ainsi lorsqu'il sera fait référence aux **macroinvertébrés** il s'agira de ce groupe d'insectes de l'ordre des **Ephéméroptères**. Nous remarquerons que l'abondance absolue et relative des Ephéméroptères varie selon l'année et la station considérée : sur l'Asse en 2016 la Ephéméroptères sont moins représentés qu'en 2015 et 2017, en D0BIS c'est en 2016 que les Ephéméroptères sont le mieux représentés.

- *Les données phytobenthos à disposition :*

Dans cette étude le phytobenthos correspond à l'ensemble des microalgues et Cyanobactéries, non identifiables à l'œil nu se développant sur des supports inertes tels les galets et blocs des cours d'eau.

Le plan d'échantillonnage du phytobenthos, communautés d'algues présentes sur le substrat de fond du cours d'eau, est identique à celui des macroinvertébrés Figure 6. Pour chaque surber réalisé, trois galets sont grattés à proximité du prélèvement de macroinvertébrés. La surface de récolte des algues est un carré de 10 cm x 10 cm chacun, soit un total de 300 cm² ; cela correspond à un échantillon de phytobenthos. Les algues sont transvasées dans les flacons puis conservées au formaldéhyde. L'identification et les comptages sont réalisés au laboratoire par le bureau d'étude Bi-Eau (Archambaud-Suard et al., 2018).

- *Choix des critères à suivre pour le plan d'échantillonnage des contenus de tubes digestifs :*

A l'aspect exploratoire de cette étude s'ajoutent des contraintes matérielles. En effet l'analyse des algues des contenus de tubes digestifs se fait sur un microscope inversé à l'IMBE (Institut Méditerranéen de la Biodiversité et d'Ecologie) de la faculté des Sciences de Saint-Jérôme à Marseille. Par la suite, afin de planifier le temps passé au laboratoire il a été estimé qu'une cinquantaine de contenus pouvaient être analysés dans le cadre de ce stage, afin de garder du temps pour les différentes étapes de l'étude : choix des macroinvertébrés à étudier ; mise en place des protocoles d'extraction des tubes digestifs et de comptage des algues de leurs contenus ; réalisation des protocoles ; saisir et analyser les résultats obtenus. Cette contrainte technique est prise en compte dans la construction du plan d'échantillonnage des Ephéméroptères.

La comparaison du cours d'eau aménagé et non aménagé se fait en considérant les deux stations d'étude préalablement présentées, **ASSE** pour l'Asse et **DOBIS** pour la Durance Figure 3,4 et 5. Dans la suite du rapport, le terme **effet station** sera employé pour parler des différences et similarités dans les contenus des tubes digestifs des Ephéméroptères sur les deux cours d'eau. Afin d'éviter la **variabilité saisonnière** seul le mois de mai est choisi. C'est la période de l'année pour laquelle le maximum d'effectifs et de richesse est observé et où les larves sont suffisamment grandes pour être disséquées. L'étude de **l'effet année** est faite en considérant **2015, 2016 et 2017**. Pour des raisons de faisabilité des dissections des macroinvertébrés, l'étude est restreinte à des individus dont la taille est de préférence supérieure à cinq millimètres. De plus pour éviter une différence trop importante entre les Ephéméroptères les tailles minimale et maximale considérées sont les plus proches de la classe de taille [5-7 mm].

La variabilité inter-habitat est réduite en choisissant des macroinvertébrés dans les habitats les plus semblables. Sur les prélèvements de macroinvertébrés du terrain, un échantillon se définit par un surber, qui est caractérisé par un habitat. Pour une même date, sur une même station trois surbers dans chacune des trois ambiances sont réalisés. La variabilité des habitats selon les trois ambiances est la plus importante d'après Emmanuel Corse (Corse, 2018) Annexe 4. Ainsi une seule ambiance est considérée pour choisir les macroinvertébrés à prélever. La variabilité inter-ambiance est réduite en ne gardant que l'ambiance 2 qui semble le mieux représenter les communautés de macroinvertébrés de la station.

Dans la suite de l'étude il est considéré que les trois surbers de l'ambiance 2 représentent l'ensemble de la station analysée. Les macroinvertébrés à disséquer pour chacun des taxons de macroinvertébrés sont sélectionnés selon leur bon état, leur taille et leur facilité de dissection parmi ces trois surbers réalisés dans l'ambiance 2.

En résumé :

- deux stations : ASSE qui représente un cours d'eau témoin non aménagé et D0BIS qui caractérise un cours d'eau aménagé,
- trois années pour une saison : mai 2015, mai 2016 et mai 2017.

b. Présentation du plan d'échantillonnage des contenus des tubes digestifs

Afin d'étudier le lien entre des larves d'insectes et le phytobenthos, les macroinvertébrés de type **racleurs et brouteurs** sont recherchés. Les taxons à étudier sont sélectionnés selon leur présence et abondance dans les échantillons disponibles en respectant les conditions précédemment énumérées. Les taxons les mieux représentés sont *Oligoneuriella rhenana*, Ephemerella, Ecdyonurus, Rhithrogena et Baetis, Figure 8. Toutefois nous remarquerons que Rhithrogena est abondante seulement dans l'Asse et que les espèces *Baetis fuscatus*, *B.lutheri* et *B.rhodani* sont abondantes essentiellement en Durance.

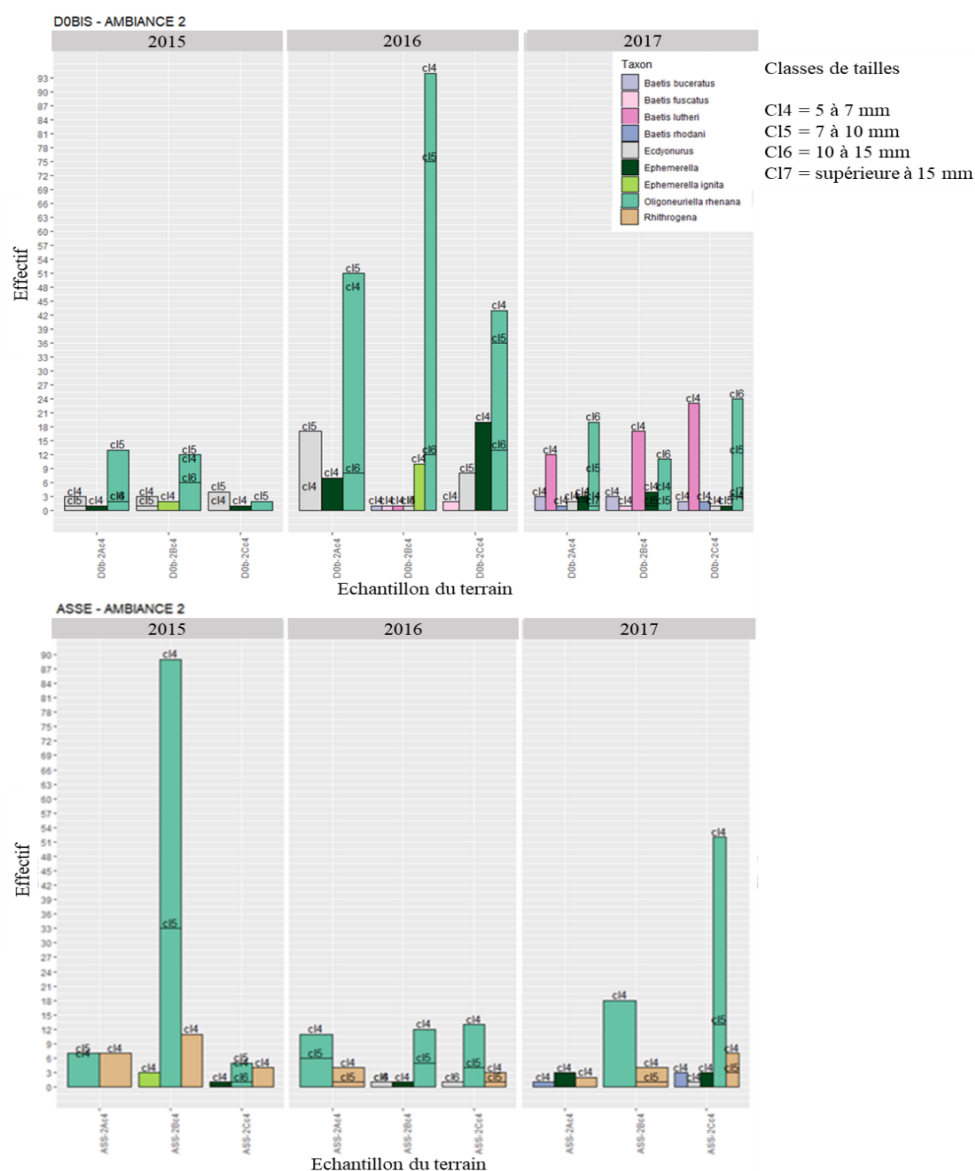


Figure 8 : Abondance (individus/0.1m²) des Ephéméroptères de taille supérieure à 5 mm dans chacun des 3 habitats de l'ambiance 2 en mai 2015, 2016 et 2017 dans les deux stations D0BIS et ASSE.

- *Comparaison des contenus d'un cours d'eau aménagé la Durance et non aménagé l'Asse :*

Dans le cadre de cette étude, les interactions trophiques entre macroinvertébrés et phytobenthos sont d'abord étudiées entre l'Asse et la Durance, pour une même date, mai 2016, et un même taxon. Afin d'étudier la variabilité inter-individus tout en tenant compte du temps de stage, 12 macroinvertébrés sur chacune des stations sont nécessaires. *Oligoneuriella* est le seul Ephéméroptère suffisamment abondant dans les échantillons issus du terrain pour réaliser cette expérience. L'ensemble des macroinvertébrés disséqués a une taille comprise entre cinq et sept millimètres.

Tableau 1: Nombre et qualités des contenus de tubes digestifs extraits pour étudier les similarités des contenus entre un cours d'eau aménagé et non aménagé

Ephéméroptère - Nombre de contenus étudiés	ASSE 2016	D0BIS 2016	Total
<i>Oligoneuriella rhenana</i>	12	12	24

- *Comparaison des contenus selon l'année, la station et le taxon*

Par la suite, la variabilité des interactions trophiques selon l'année, la station et le taxon sera étudiée. Le nombre de macroinvertébrés par condition est limité par l'abondance des Ephéméroptères répondant à l'ensemble des critères dans les échantillons du terrain. Ainsi afin de limiter les valeurs extrêmes, un minimum de trois éphéméroptères par condition est imposé. Les trois taxons étudiés seront *Oligoneuriella rhenana*, *Ephemerella* et *Ecdyonurus*.

Tableau 2: Nombre et qualités des contenus de tubes digestif extraits pour étudier les similarités spatiales et temporelles et inter taxon d'Ephéméroptères

Ephéméroptère – Nombre de contenus étudiés	D0BIS 2015	D0BIS 2016	D0BIS 2017	ASSE 2015	ASSE 2016	ASSE 2017	Total
<i>Oligoneuriella rhenana</i>	3	3	3	3	3	3	18
<i>Ephemerella</i>	3	3	3	3	2	3	17
<i>Ecdyonurus</i>	3	3	3	3	3	3	18
Total	9	9	9	9	8	9	53

Pour certaines conditions il n'a pas été possible d'avoir des individus dissécables de taille comprise entre 5 mm et 7 mm. Dans le jeu de données obtenu il y a trois *Oligoneuriella* en 2017 sur D0BIS de taille comprise entre 8 et 9 mm, une *Ephemerella* sur l'Asse en 2016 à 4,5 mm, trois *Ecdyonurus* sur ASSE en 2015 entre 3,4 et 4,1 mm, un *Ecdyonurus* sur l'Asse en 2016 de 4 mm et deux *Ecdyonurus* en 2017 de taille comprise entre 2,6 et 4,1 mm.

Au total **71** tubes digestifs ont été extraits et leurs algues comptabilisées au microscope inversé.

2) Définition du phytobenthos et présentation des macroinvertébrés choisis

a. Le phytobenthos

Le phytobenthos est aussi connu sous les noms d'algues épilithiques, périphyton et biofilm. Le développement du phytobenthos est constitué de plusieurs étapes : installation d'une couche mince de matière organique et de bactéries ; développement d'algues unicellulaires, puis d'algues filamenteuses. La vitesse du courant et la pression de broutage sont des facteurs pouvant modifier la structure de ces communautés algales (Fayolle et al., 1999).

La sensibilité des algues composant le phytobenthos aux paramètres physiques et chimiques d'un cours d'eau, en font un excellent indicateur de suivi de la qualité des masses d'eau. Des protocoles comme l'Indice Biologique Diatomées (IBD) permettent l'évaluation de l'état des masses d'eau en comptabilisant les différentes espèces diatomiques présentes dans le milieu.

Dans le cadre de ce stage les algues vertes filamenteuses, algues rouges filamenteuses, algues unicellulaires et diatomées consommées sont étudiées.

Les chlorophycées filamenteuses (Figure 9) nommées *algues vertes filamenteuses (AVF)* dans cette étude, comme Spirogyra (**SPIRO**), Ulothrix (**ULOT**), et Cladophora (**CLADO**), montrent une adaptation à différents régimes hydrologiques. Par exemple, en aval d'une retenue d'eau, Cladophora tend à proliférer tandis que Ulothrix régresse (Fayolle et al., 1999).

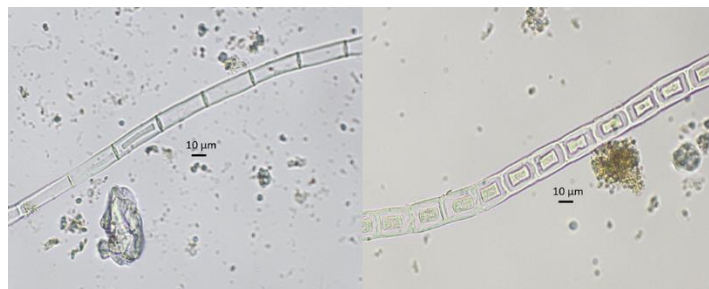


Figure 9 : Photographie au microscope inversé d'algues vertes filamenteuses dans un contenu de tube digestif, à gauche Spirogyra et à droite Ulothrix (Photographie Léa Voisin, Université Saint Jérôme, 2019)

Les chlorophycées unicellulaires (Figure 10) nommées *algues vertes unicellulaires (AVU)* dans la suite du rapport, font référence par exemple à Staurastrum (**STAU**) et Cosmarium (**COSM**).

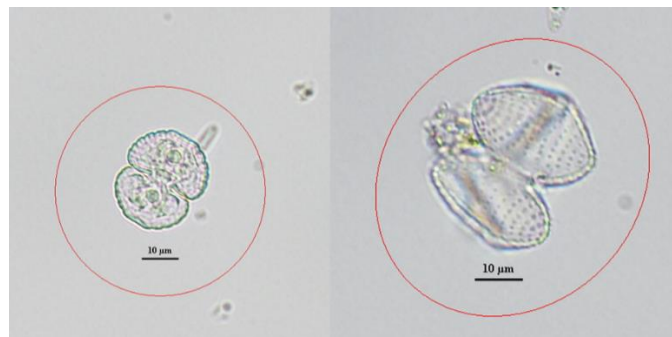


Figure 10 : Photographie au microscope inversé d'algues vertes unicellulaires dans un contenu de tube digestif, à gauche Cosmarium et à droite Staurastrum (Photographie Léa Voisin, Université Saint Jérôme, 2019)

Les rhodophycées (Figure 11) ici appelés *algues rouges filamenteuses (ARF)*, sont dans notre étude représentées par *Audouinella sp.* (**AUD**) et *Bangia atropurpurea* (**BANG**). En débit réservé *Audouinella sp.* est majoritaire en aval de la retenue d'eau, *Bangia atropurpurea*, pourtant présente en amont, est moins présente. Le facteur thermique expliquerait ces changements, *Bangia* se retrouvant dans des eaux plus froides, par conséquent sur une portion où le débit est non réservé (Fayolle et al., 1999).



Figure 11 : Photographie au microscope inversé, dans un contenu de tube digestif de *Audouinella* (Photographie Léa Voisin, Université Saint Jérôme, 2019)

Les diatomées (Figure 12) sont des algues unicellulaires, issues de la lignée des algues brunes. Elles sont constituées d'un squelette siliceux, au niveau duquel se distinguent deux valves, des ceintures connectives, des stries et un raphé. La forme et les différentes pièces de ce squelette diffèrent selon les genres et espèces de diatomées. Dans cette étude les groupe de diatomées dominants sont *Achnanthidium* – *Achnanthes* (**ACHN**), *Cymbella* – *Encyonema* – *Cymbopleura* – *Amphora* (**CYMB**), *Gomphonema* (**GOMP**). Les diatomées sont les algues qui semblent avoir la meilleure adaptation aux variations hydrologiques, par des transformations structurales et architecturales (Fayolle et al., 1999).

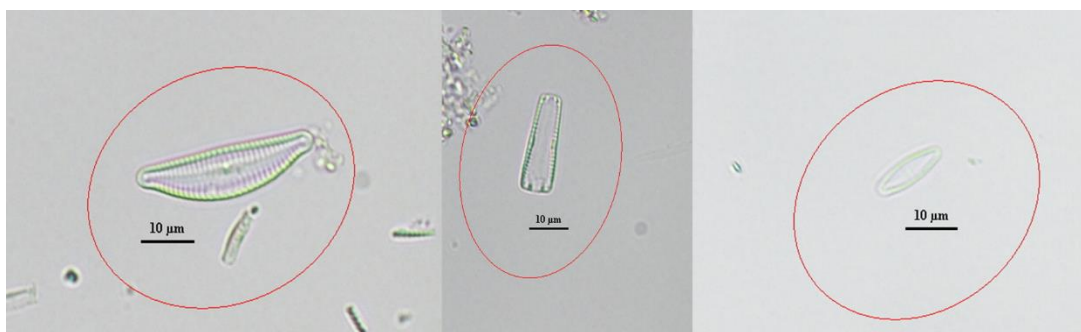


Figure 12 : Photographie au microscope inversé de diatomées dans un contenu de tube digestif, à gauche *Cymbella*, au centre *Gomphonema* et à droite *Achnanthidium* (Photographie Léa Voisin, Université Saint Jérôme, 2019)

Les cyanophycées ou les cyanobactéries (**CYA**), sont des organismes unicellulaires, pouvant se regrouper sous forme de filaments ou d'amas. Certaines de ces cyanobactéries produisent des cyanotoxines dangereuses pour les hommes et les animaux. Elles se développent souvent dans les eaux stagnantes, où les taux de phosphore et d'azote sont conséquents. Leur développement dans les masses, sous forme de blooms algaux est de plus en plus important avec le réchauffement climatique (Carey et al., 2012). Elles sont en densité, toutes espèces confondues, une des algues les plus abondantes dans le phytobenthos en Durance et sur l'Asse Annexe 9. Cependant leur biovolume est minime comparativement aux autres algues. Une entité, représente une cellule de cyanobactérie. L'identification au genre avec la méthode utilisée pour les contenus des tubes digestifs est complexe.

b. Les macroinvertébrés

Dans cette étude les larves d'Ephéméroptères sont étudiées. Ces insectes se différencient par leurs yeux composés, deux ou trois cerques multiarticulés, une griffe au tarse et des branchies abdominales latérales chez les larves âgées. La Figure 13 illustre ces différents critères de détermination (Tachet et al., 2015).

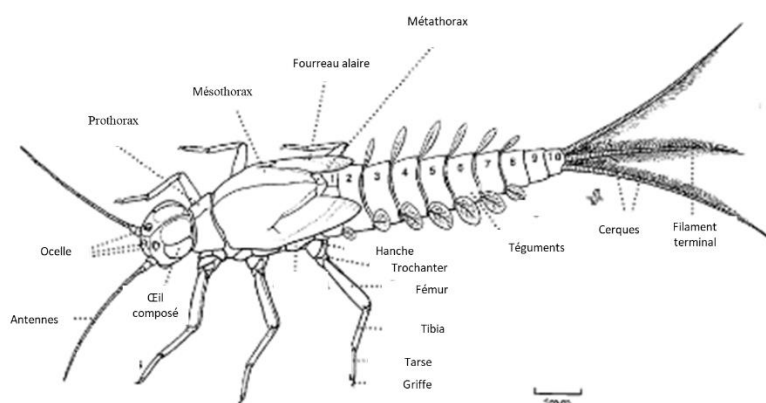


Figure 13 : Présentation des caractéristiques morphologiques des Ephéméroptères - source (Elliott and Humpesch, 2010)

Les familles d'Ephéméroptères sont diversifiées : présence en eau stagnante et courante, comportement fouisseurs, rampants et nageurs, et alimentation de type broyeurs détritivores, racleurs de substrat, filtreurs et prédateurs. Dans cette étude, les racleurs de substrats sont priorisés. Une dispersion des larves est assurée par la dérive. Certains adultes en vol peuvent aussi assurer la dispersion en remontant plusieurs kilomètres. Le cycle de vie des Ephéméroptères est présenté Figure 14.

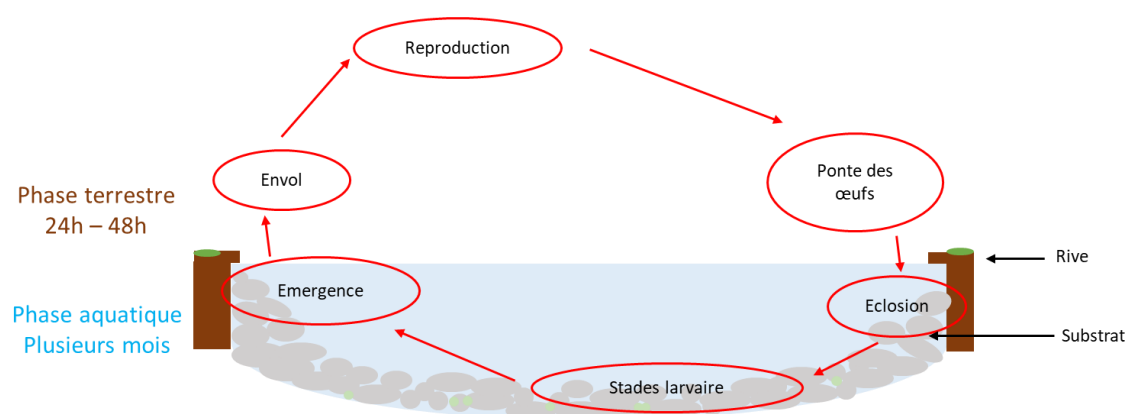


Figure 14 : Cycle de vie des Ephéméroptères source (Elliott and Humpesch, 2010)

Oligoneuriella rhenana est l'Ephéméroptère majoritaire en moyenne sur les années 2015, 2016 et 2017 sur l'Asse et la Durance, pour une taille supérieure à 5 mm, excepté en 2017 où *Baetis lutheri* domine en Durance. Par la suite comme le montre la Figure 8, *Ephemerella* et *Ecdyonurus* sont les individus majoritaires répondant aux critères fixés. Afin de mener au mieux cette étude il est indispensable de connaître l'écologie des taxons dont le régime alimentaire est étudié.

Les principaux caractères de détermination, les microhabitats et les comportements alimentaires, pour chacun des macroinvertébrés utilisés dans l'étude sont présentés ci-dessous. Certains traits biologiques d'Oligoneuriella, Ephemerella et Ecdyonurus sont indiqués Tableau 3 (Tachet et al., 2015).

- *Oligoneuriella rhenana* d'après Henri Tachet (Tachet et al., 2015)



Figure 15 : Photographie d'Oligoneuriella – auteur JP Balmain, Irstea

Critères de détermination : De la famille Oligoneuriidae, elle se différencie des autres Ephéméroptères par des branchies simples, bifides ou multifides, une position des yeux dorsale, une tête en ogive ainsi que de longues soies dans le bord antérieur des tibias.

Comportement alimentaire : Les traits biologiques contribuant au comportement alimentaire sont caractérisés par une préférence pour les microphytes vivants, et un mode d'alimentation racleur, brouteur et filtreur.

Microhabitat : En ce qui concerne le microhabitat, cette larve a une préférence pour les dalles, blocs et pierres, puis les limons et accessoirement les macrophytes et algues filamenteuses.

Dans nos données, il s'agit bien de cette espèce même si par simplicité seuls les noms de genre seront cités.

- *Ephemerella* sp. d'après Henri Tachet (Tachet et al., 2015)



Figure 16 : Photographie de Ephemerella – auteur JP Balmain, Irstea

Critères de détermination : De la famille Ephemerellidae. Ephemerella se distingue principalement par des yeux en position latéro-dorsale et ses 5 paires dorsales de branchies ; elle est non trapue, avec des branchies courtes et des soies peu nombreuses.

Comportement alimentaire : Le type de nourriture est composé de microphytes et macrophytes vivants. Son mode d'alimentation est broyeur et racleur, brouteur essentiellement.

Microhabitat : Son microhabitat est caractérisé par des graviers, sables, et parfois par les macrophytes et algues filamenteuses.

Dans nos données, il s'agit de l'espèce *Ephemerella ignita*.

- *Ecdyonurus* sp. d'après Henri Tachet (Tachet et al., 2015)



Figure 17 :
Photographie de
Ecdyonurus – auteur JP
Balmain, Irstea

Critères de détermination : De la famille Heptageniidae, les yeux sont en position dorsale et la tête n'est pas en ogive. *Ecdyonurus* se distingue des autres genres d'Heptageniidae par 3 cerques et des bords latéro-postérieurs qui forment une expansion.

Comportement alimentaire : Son alimentation est composée par des débris végétaux, des microphytes vivants et des débris organiques ; le mode d'ingestion de ces éléments est broyeur et racleur, brouteur.

Microhabitat : Le microhabitat préférentiel de ces macroinvertébrés est constitué de dalles, blocs, pierres et galets.

Il n'est pas été possible d'identifier ce genre à l'espèce, car plusieurs sont présentes.

Les principaux traits biologiques utilisés dans cette étude sont résumés dans le Tableau 3. Les notes attribuées en face de chaque catégorie vont de 1 à 5, ce qui représente une préférence importante (Tachet et al., 2015).

Tableau 3: Récapitulatif du comportement alimentaire des macroinvertébrés étudiés, tableau extrait de l'ouvrage de Henri Tachet (Tachet et al., 2015) – plus le chiffre est élevé plus l'affinité est grande (de 0 à 5)

	Oligoneuriella	Ephemerella	Ecdyonurus
Type de nourriture	Sédiment fin + microorganisme : 1 Débris <1 mm : 2 Microphytes vivants : 3	Débris < 1mm : 1 Débris végétaux > 1mm : 1 Microphytes vivants : 4 Macrophytes vivants : 3	Sédiment fin + microorganisme : 1 Débris <1mm : 2 Débris végétaux > 1 mm : 3 Microphytes vivants : 2
Mode d'alimentation	Mangeur de sédiments fins : 2 Racleur, brouteur : 2 Filtreur : 3	Mangeur de sédiments fin : 1 Broyeur : 2 Racleur, brouteur : 2	Broyeur : 2 Racleur, brouteur : 3
Microhabitats	Dalles ; blocs, pierres, galets : 3 Limon : 3 Macrophytes et algues filamenteuses : 2	Graviers : 4 Sables : 5 Limon : 1 Macrophytes et algues filamenteuses : 1 Branches, racines : 1 Litières : 1 Vase : 3	Dalles, blocs, pierres, galets : 4 Graviers : 1 Sable : 1 Limon : 1 Branches , racines : 1

3) Protocole d'extraction des tubes digestifs

Les macroinvertébrés à disséquer sont sélectionnés dans l'échantillon du laboratoire selon les critères d'identification des macroinvertébrés d'eau douce (Tachet et al., 2015) et l'avis de spécialistes (Gaït Archambaud ; Léa Voisin). La sélection se fait en priorisant les individus ayant une taille comprise entre 5 mm et 7 mm. Les macroinvertébrés les moins abîmés sont sélectionnés.

L'individu à disséquer est placé sous la loupe binoculaire dans une coupelle en verre en immersion totale dans de l'eau distillée. La taille est relevée en utilisant le quadrillage millimétré placé sous la loupe binoculaire Figure 18.

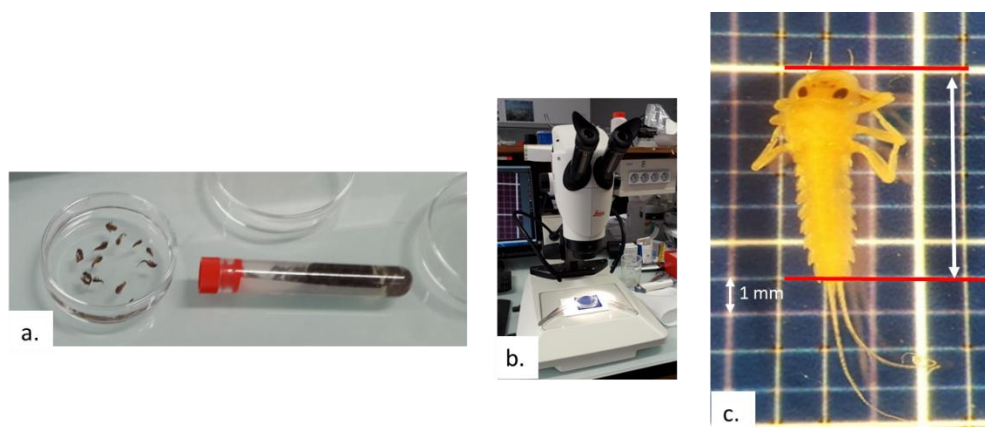


Figure 18 : Photographies des premières étapes au laboratoire -a. Sélection des 3 individus à disséquer dans un échantillon -b. Observation et dissection réalisées sous la loupe binoculaire - c. Mesure de la taille de l'individu à disséquer avec l'exemple d'Oligoneuriella

La dissection permettant d'extraire le tube digestif s'effectue ventralement (Tierno de Figueroa et al., 2019). Les branchies sont dégagées afin de faciliter la dissection. Le tube digestif est dégagé au niveau de la tête dans un premier temps. La paroi est minutieusement découpée au niveau de chacun des sternites à l'aide de deux pinces extrêmement fines de manière à ne pas abîmer le tube digestif et l'invertébré Figure 19. Le tube digestif est ensuite extrait de l'individu.

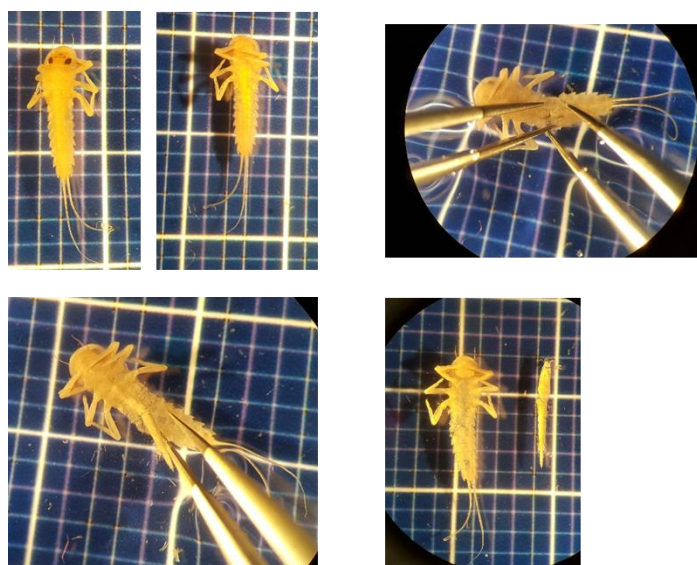


Figure 19 : Photographies des différentes étapes de la dissection avec Oligoneuriella rhenana – dissection réalisée par Léa Voisin (auteur Léa Voisin , Irstea)

Le tube digestif est qualifié en observant longueur, largeur, contenance et la surface qu'occupe son contenu. Ces informations ne pourront pas être réellement exploitées car elles comportent de nombreuses incertitudes, cependant elles pourront être utiles pour aider à la compréhension de certains résultats.

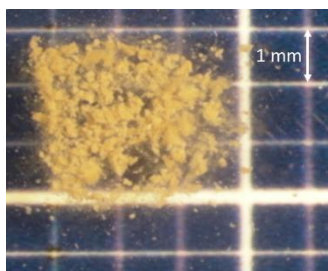


Figure 20 : Contenus de tubes digestifs d'*Oligoneuriella*

Le contenu du tube est extrait de sa membrane et les particules sont dissociées Figure 20 ; le contenu est récupéré à l'aide d'une micropipette, le tout disposé dans un microtube de 1,5 mL. L'ajout de 200 μ L de formol à 30% permet la conservation du contenu du tube digestif.

L'invertébré associé au tube digestif est placé dans un microtube de 1,5 mL avec quelques microlitres de solution d'éthanol, avec l'objectif si nécessaire, dans un second temps, d'étudier l'alimentation des macroinvertébrés aquatiques selon leur croissance.

4) Protocole d'identification des contenus des tubes digestifs

Les algues contenues dans les tubes digestifs sont identifiées et quantifiées au microscope inversé selon le guide d'identification des diatomées (Coste et al., 2011), le guide d'identification des algues verte d'eau douce (Bourrelly and Heim, 1990), et l'avis d'une spécialiste (Stéphanie Fayolle).

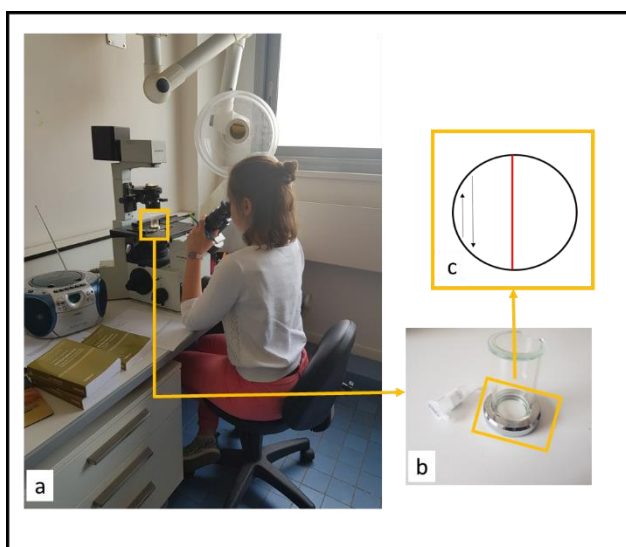


Figure 21 :- a. Microscope inversé -b. Chambre de sédimentation -c. Méthode de balayage de la cuve pour la quantification des cellules algales

Le tube digestif est déposé dans une chambre de sédimentation pendant un minimum de 12 heures. La chambre de sédimentation est placée sous le microscope inversé et est balayée ligne par ligne, comme illustré sur la Figure 21.

Par souci de faisabilité, le comptage et l'identification sont arrêtés au bout d'au moins 400 entités comptées. De plus il est estimé que ces 400 entités sont représentatives de l'ensemble du contenu du tube digestif.

L'identification au genre est la plus réalisable au vu du stade de digestion des algues observées. Une diatomée non identifiable sera comptée comme un fragment de diatomée, une diatomée identifiable même si

c'est un fragment sera comptabilisée en indiquant son genre. Les fragments de diatomées non identifiables au genre sont rangés dans la catégorie fragment de diatomées (**FD**), Figure 22.

Certains genres de diatomées sont regroupés afin de faciliter l'identification. C'est le cas des groupes : **CYMB** qui regroupe *Cymbella*, *Cymbopleura*, *Encyonema* et *Amphora*, **FRAG** qui regroupe *Fragilaria* et *Ulnaria* et **NAVI** composé de *Navicula* et *Sellaphora* (*comm pers.* Stéphanie Fayolle).

Les chlorophycées filamenteuses, sont identifiées au genre si c'est possible, ou rangées dans la catégorie *algues vertes filamenteuses* (**AVF**). Une entité correspond à une cellule de l'algue filamenteuse.



Figure 22 : Exemple d'algues trouvées dans les tubes digestifs observation au microscope inversé

Les chlorophycées unicellulaires sont si possible identifiées au genre. Une algue verte unicellulaire est considérée comme une entité qu'elle soit entière ou non. Lorsque l'algue n'est pas identifiable au genre, elle est rangée dans la catégorie, *algues vertes unicellulaires (AVU)*.

Les rhodophycées sont comptabilisées de la même manière que les algues vertes filamenteuses, en les rangeant dans la catégorie *algues rouges filamenteuses (ARF)* lorsqu'elles ne sont pas identifiables au genre.

Les cyanobactéries sont toutes regroupées dans l'ensemble cyanobactéries quelle que soit l'espèce. Leur état dans les contenus ne permet pas une identification, même au genre. Lorsqu'un filament de cyanobactérie est rencontré, seules les cellules visibles sont comptabilisées.

Le reste des algues est rangé dans les catégories, *algues indéterminées (AI)* et *algues filamenteuses (AF)*.

Point sur le vocabulaire utilisé dans le rapport de stage :

Macroinvertébrés : Ephéméroptères, Oligoneuriella, Ephemerella, Ecdyonurus.

Phytobenthos : Algues récoltées en grattant les pierres sur le terrain suivant le protocole précédemment présenté. Aussi appelé algues du Terrain.

Groupe d'algues : regroupement pertinent de plusieurs genres d'algues afin de faciliter l'étude des contenus de tubes digestifs, la liste est détaillée en Annexe 1.

Contenus : ensemble des éléments se trouvant dans les tubes digestifs des macroinvertébrés.

Algues des contenus : algues se trouvant dans les contenus.

Effet station : étude des similitudes des contenus entre un cours d'eau aménagé, station D0BIS et non aménagé station ASSE. Une importance plus grande sur l'Asse que la Durance fera référence aux stations D0BIS et ASSE et non à la totalité du cours d'eau.

Effet année : étude des similitudes des contenus selon l'année 2015, 2016, 2017, comparaison pour un même mois, mai.

Effet taxon : étude des similitudes des contenus selon les taxons macroinvertébrés : du genre Oligoneuriella, Ephemerella et Ecdyonurus.

5) Présentation des méthodes d'analyse des résultats obtenus

a. La transformation de la base de données

Dans le protocole d'analyse des contenus il est établi que 400 entités doivent être comptées afin d'estimer de manière correcte le contenu du tube digestif. Dans certains cas il n'a pas été possible de compter 400 entités.

Pour l'analyse des résultats obtenus il est établi qu'en dessous de 200 entités algales comptées dans un contenu, celui-ci est considéré comme vide et supprimé de la base de données. Ceci concerne trois Ephéméroptères : **une Ephemerella sur l'Asse en 2017 et deux Ecdyonurus sur l'Asse en 2017.**

Par la suite, les fragments de diatomées (**FD**), les algues indéterminées (**AI**) autres que les diatomées et les algues filamenteuses, sont supprimés pour les analyses multivariées. En effet ces éléments font partie des contenus de tubes digestifs. S'il est nécessaire de les prendre en compte dans les analyses de contenus, ils sont cependant problématiques pour la comparaison des contenus de tubes digestifs et sont par conséquent supprimés.

b. Observer les différences entre les contenus de tubes digestifs de l'Asse et de la Durance

- *Richesse et indice de Strauss*

La richesse en algues est calculée pour chacun des contenus de tubes digestifs. La richesse des groupes d'un contenu de tube digestif correspond aux nombres de groupes d'algues différents identifiés.

L'indice de Shannon, un indice de diversité prenant en compte l'abondance des groupes d'algues dans le contenu du tube digestif, est calculé selon l'équation (1).

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \cdot \ln(p_i) \text{ où } p_i = \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

Avec n_i nombre d'entités du groupe d'algues i dans le contenu de tube digestif, N le nombre total d'entités dans l'ensemble du contenu de tube digestif et S le nombre total de groupes d'algues différents dans le contenu de tube digestif.

- *Courbe de raréfaction*

Afin d'évaluer la variabilité des contenus d'un même taxon de macroinvertébrés sur l'Asse et la Durance une courbe d'accumulation des différents groupes d'algues rencontrés dans les contenus est réalisée. Connue aussi sous le nom de courbe de raréfaction, elle est réalisée avec la fonction « specaccum » du package *vegan* du logiciel R (Oksanen et al., 2019). La fonction « specaccum » trace une courbe de raréfaction, en utilisant un algorithme de permutations calculant après chaque prise en compte d'un tube digestif supplémentaire la diversité ajoutée.

- *Similarité et dissimilarité avec la distance de Bray-Curtis*

La distance de Bray-Curtis permet d'évaluer par une formule mathématique (2) la « distance » qui sépare deux macroinvertébrés, en considérant la diversité algale de leurs contenus.

$$D = 1 - 2 \frac{\sum_{i=1}^s \min(a_i, c_i)}{\sum_{i=1}^s (a_i + c_i)} \quad (2)$$

Avec s = le nombre de groupes d'algues présent dans le jeu de données, a_i = l'abondance du groupe d'algue i dans le macroinvertébré a et c_i = l'abondance du groupe d'algue i dans le macroinvertébré c (Kindt and Richard, 2005).

Les données étant probablement non métriques, la distance entre individu intra et inter station est calculée avec la formule de Bray-Curtis (Kindt and Richard, 2005).

- c. Observer la similarité entre contenus algaux de tubes digestifs : utilisation de méthodes d'ordination

L'emploi de méthodes d'ordination classe l'ensemble des contenus de tubes digestifs étudiés selon leur similarité, dans un graphique à deux dimensions. Ces méthodes permettent de visualiser l'ensemble des relevés d'algues dans les contenus et d'identifier des relations entre composition de contenus de tubes digestifs et variables environnementales. Les variables « environnementales » sont les stations, Asse et Durance ; les années 2015, 2016 et 2017 ; les taxons de macroinvertébrés *Oligoneuriella*, *Ecdyonurus* et *Ephemerella*.

La présence d'espèces rares complexifie l'interprétation de certaines ordinations. Les résultats de l'AFC sont difficilement interprétables si les espèces rares trouvées dans le contenu des tubes digestifs sont conservées (Legendre and Gallagher, 2001). En effet l'AFC présente quelques désavantages liés à la distance du Khi². « La différence entre les abondances pour les espèces communes contribue moins à la distance que la même différence entre espèces rares, ainsi les espèces rares ont une influence outre mesure dans l'analyse » (Legendre and Gallagher, 2001).

Les groupes d'algues considérées comme des espèces rares, sont ceux ayant une abondance relative dans l'ensemble des contenus inférieur à 0,1 %. Ces taxons après avoir été identifiés sont supprimés du jeu de données pour l'ensemble des analyses multivariées.

- ***Réalisation d'une AFC : Mise en évidence des singularités des contenus de tubes digestifs***

Une Analyse Factorielle des Correspondances permet de représenter par des méthodes géométriques et algébriques les lignes et les colonnes d'un relevé d'espèces. Un profil ligne et un profil colonne sont calculés, selon le principe des probabilités conditionnelles. Les proximités entre les profils sont ensuite calculées. Le tout est représenté sur deux nuages de points après avoir évalué les proximités en calculant la distance du Khi² qui accentue sur les singularités du tableau de données. L'idée est de représenter des distances entre variables dans un espace à deux dimensions. Les points variables sont projetés sur chacun des axes. Ces axes portent le nom de dimensions. Les axes pour lesquels le plus de variables sont le mieux représentées sont les axes les plus représentatifs de l'ensemble du jeu de données (Lebart et al., 1995). L'AFC permet de mettre en évidence les singularités entre les contenus de tubes digestifs. L'analyse est réalisée avec la fonction « CA » du package *FactomineR* exécutée avec le logiciel R (Lê et al., 2008). L'affichage d'ellipses sur l'AFC est réalisé pour une meilleure visualisation des résultats avec le package *ade4*.

- **Réalisation d'un ACP non normée** : Mise en évidence des grandes similitudes entre les contenus de tubes digestifs

La réalisation d'une ACP sur un relevé d'espèces est critiquable. L'ACP calcule des distances euclidiennes qui ne sont pas conseillées pour un relevé d'espèces. Une transformation des données est nécessaire avant la réalisation d'une ACP sur un relevé d'espèce.

Cette transformation permet de réduire dans l'analyse l'influence des taxons les plus abondants. Les transformations peuvent être un $\ln + 1$ transformation, ou une transformation d'Hellinger (Legendre and Gallagher, 2001). Dans cette étude, il est choisi de passer en abondance relative afin de réduire l'incertitude liée au nombre d'entité d'algues échantillonnées dans chacun des contenus de tubes digestif (Kindt and Richard, 2005). En effet une des critiques du protocole d'analyse des contenus des tubes digestifs est le fait que le nombre d'algues compté varie entre 634 et 249. Ce qui peut fausser les abondances de certaines espèces lorsque le comptage est arrêté à 600 ou à 400.

Le tableau de données contient alors des valeurs entre 0 et 1. L'unité étant la même pour chacune des variables il n'est pas nécessaire de réduire les données, cette opération permet de conserver les relations entre les différentes colonnes (algues). Ainsi, la réalisation d'une ACP non normée permet d'identifier quelles sont les variables, dans notre cas les taxons d'algues qui contribuent le plus à la structuration du jeu de données.

L'ACP est réalisée avec le package *FactomineR* du logiciel R (Lê et al., 2008) et la fonction « PCA » en indiquant « scale.unit = FALSE », pour ne pas réduire les données.

- **Analyse canonique de redondance (RDA) et Permanova** : Regarder la significativité des interactions entre le relevé d'espèces et les variables environnementales

Cette analyse est faite avec la fonction « rda » du package *vegan*. Elle permet de regarder les relations linéaires entre variables environnementales (année, station et taxon) et le relevé d'espèces. Une permanova à la suite de la rda, montre la significativité des relations linéaires visualisées avec la RDA. Une permanova fonctionne sur le même principe qu'une anova mais en réalisant des permutations ce qui est moins contraignant sur les conditions de son emploi.

d. Etude du taux de sélectivité des macroinvertébrés dans leur alimentation

Dans cette partie les relevés d'algues dans les contenus des tubes digestifs et du terrain sont homogénéisés. Au vu de la différence entre les genres d'**AVF**, **ARF** et **AVU** entre le terrain et les contenus, il est préférable de ne pas réaliser de regroupement pour les comparaisons, les deux listes sont composées d'un regroupement des algues au genre, excepté pour les **CYA**.

Le taux de sélectivité des macroinvertébrés sur les différents groupes d'algues est calculé avec l'**indice linéaire de Strauss** (Maasri et al., 2010). L'index se traduit de la manière suivante :

$$Li = ri - pi$$

où **ri** est l'abondance relative du groupe d'algue, **i** dans le contenu du tube digestif, **pi** est l'abondance relative du groupe d'algue **i** dans le milieu naturel.

Le choix de cet indice permettra de faire une comparaison avec l'étude d'Alain Massri (Maasri et al., 2010) sur les contenus de chironomes. L'indice de Strauss est compris entre -1 et 1. Une valeur **nulle** indique qu'il n'y a ni préférence ni évitement de la part des macroinvertébrés pour le groupe d'algues, une valeur **positive** indique qu'il y a une préférence pour le groupe d'algues et une valeur **négative** montre que le groupe d'algues a tendance à être évité par les macroinvertébrés (Maasri et al., 2010).

Au vu des fortes probabilités de dérive ou d'autre déplacement des macroinvertébrés, dans cette étude, **l'ensemble des algues échantillonnées pour une station à une date donnée est considéré**, afin de les comparer aux contenus de tubes digestifs associés à la même station et date. Pour une même station et date, le phytobenthos identifié est sommé, puis transformé en abondance relative.

Les listes taxonomiques des contenus de tubes digestifs et du phytobenthos sont homogénéisées à un même niveau d'identification afin de pouvoir être comparées.

e. Comparaison de moyenne : Test de Wilcoxon

Certaines tendances se dégagent des analyses effectuées. Afin de confirmer leur significativité un test de comparaison de moyenne est réalisé. Le nombre d'échantillons par conditions à tester étant compris entre 9 et 18, les variables à tester n'étant pas toujours paramétrique, le test de Wilcoxon est choisi. Le test est réalisé par le logiciel R et la fonction « wilcox.test ».

En résumé :

Indice de diversité : Comparaison des contenus d'un cours d'eau aménagé et non aménagé.

Courbe de raréfaction et indice de Bray-Curtis : Estimer la variabilité inter-individus

AFC : Faire ressortir les singularités de la comparaison des contenus selon le taxon, l'année et la station

ACP : Etudier quels groupes d'algues structurent l'ensemble des contenus de tubes digestifs

RDA : Analyser la significativité des effets stations, taxons et années et de leurs interactions

Indice de Strauss : Comparer les algues dans les contenus et sur le terrain. Les macroinvertébrés sont-ils sélectifs dans leur consommation en phytobenthos ?

Test Wilcoxon : Regarder si la différence entre deux moyennes est significative.

Le chapitre III présente **les résultats obtenus pour la première question de l'étude** à savoir : quelle est la variabilité dans les interactions trophiques phytobenthos et macroinvertébrés pour un taxon à une date donnée ?

III- PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS POUR OLIGONEURIELLA EN MAI 2016 SUR L'ASSE COURS D'EAU NON AMENAGE ET LA DURANCE COURS D'EAU AMENAGE

1) Présentation des similarités entre contenus de tubes digestifs pour une même année et un même taxon, sur un cours d'eau aménagé et non aménagé

La composition des contenus des 24 tubes digestifs d'*Oligoneuriella rhenana*, prélevés aux stations ASSE et DOBIS est présentée Figure 23. A première vue les contenus sont semblables sur les deux stations, avec une abondance de **FD**, puis du groupe de diatomées **CYMB**, au même titre que les groupes **ACHN** et **GOMP**. Le codage du nom des taxons d'algues est visible en Annexe 1. Le détail des abondances et occurrences des algues dans les contenus est présenté en Annexe 5.

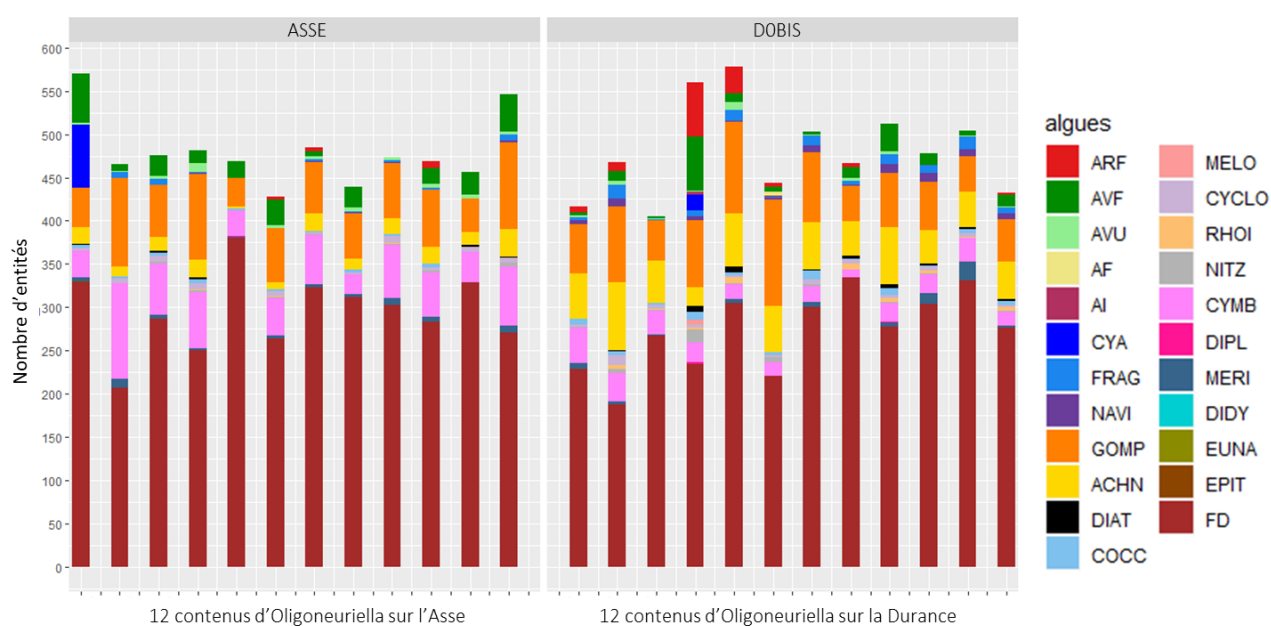


Figure 23 : Présentation de la composition des contenus de tubes digestifs de 12 *Oligoneuriella* sur l'Asse et la Durance

La présence d'algues rouges filamenteuses, d'algues vertes filamenteuses et d'algues vertes unicellulaires est aussi visible dans les contenus de tubes digestifs. Les **algues rouges filamenteuses (ARF)** sont constituées en particulier d'*Audouinella* à 36% et *Bangia atropurpurea* à 64%. Les **algues vertes filamenteuses (AVF)** sont inidentifiables au genre dans 40 % des cas, parmi les genres identifiés, il y a une dominance de *Spirogyra* à 46%, puis d'*Ulothrix* avec 9%. Les **algues vertes unicellulaires (AVU)**, sont représenté à 51% par *Cosmarium* et 6% par *Staurostrum*, le reste sont des algues unicellulaires non identifiables ou peu fréquentes Figure 24.

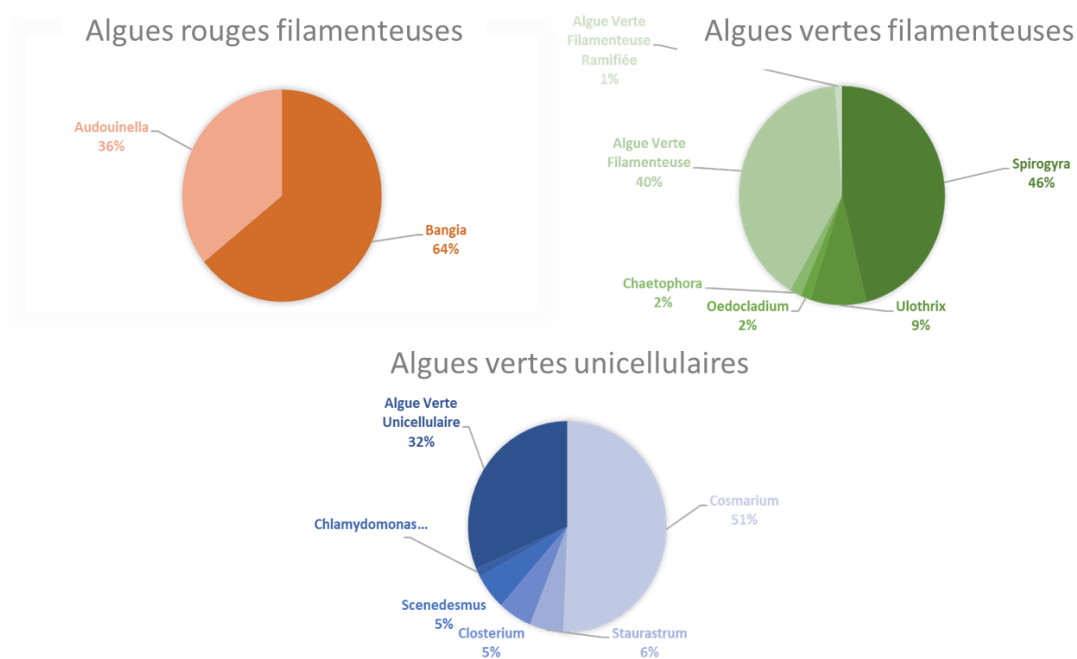


Figure 24 : Composition de groupes Algues rouges filamenteuses, Algues vertes filamenteuses et Algues vertes unicellulaires

La Figure 25, permet de visualiser des dissemblances entre les deux cours d'eau, notamment en termes d'abondance des groupes d'algues dominants dans les contenus de tubes digestifs.

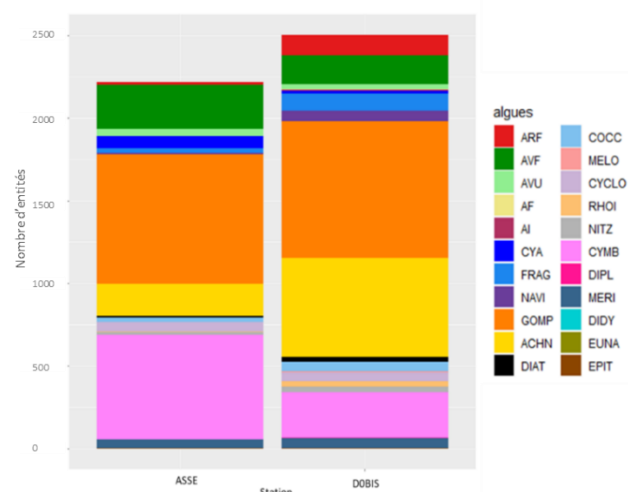


Figure 25 : Comparaison de la composition des contenus sur l'Asse et la Durance après suppression des fragments de diatomées pour une meilleure visualisation des résultats, somme des douze contenus par station.

Le groupe d'algues **CYMB** (en rose) est plus abondant dans les contenus de tubes digestifs de l'Asse. Inversement c'est le groupe d'algues **ACHN** (en jaune) qui est plus abondant dans les tubes digestifs de la Durance. Cette première observation suggère une différence dans les contenus des tubes digestifs des deux cours d'eau pour *Oligoneuriella rhenana*, en mai 2016.

Tout comme indiqué et défini dans la partie méthodologie, les groupes d'**algues rares**, **fragments de diatomées (FD)**, **algues indéterminées (AI)** et **algues filamenteuses (AF)** sont supprimés des données.

La différence de composition des contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella, entre l'Asse et la Durance, est testée en calculant **la richesse taxonomique** et **l'indice de Shannon**.

Le calcul de l'indice de Shannon permet de rendre compte de la diversité des contenus en considérant l'abondance des taxons d'algues. Les variables testées ne suivent pas de loi paramétrique. Le test de Wilcoxon est appliqué, à l'aide de la fonction « wilcox.test » du logiciel R.

Tableau 3 : Comparaison des indices de diversités moyen entre les contenus de l'Asse et de la Durance

	Moyenne	Ecart-type	pvalue
Richesse Taxonomique			
ASSE	10,25	1,96	
D0BIS	12,67	1,55	0,001
Indice de Shannon			
ASSE	1,62	0,16	
D0BIS	1,85	0,22	0,004

La **richesse** des contenus est 1,2 fois **plus élevée** en **D0BIS** que dans **ASSE**. De même l'**indice de Shannon** de D0BIS est 1,14 fois **supérieur** à celui de ASSE.

L'hypothèse nulle supposant que la différence moyenne d'abondance de la richesse spécifique et de l'indice de Shannon sont identiques sur ASSE et D0BIS est testée avec le test de Wilcoxon. La pvalue est inférieure à 5% ce qui signifie que H0 n'est pas validé. Les différences de moyennes de richesse et d'indice de Shannon observées entre ASSE et D0BIS sont significatives Tableau 3.

Dans l'objectif d'évaluer la puissance des différences observées entre les deux stations, les variabilités intra et inter contenus de tubes digestifs sont analysées.

2) Combien de contenus de tubes digestifs sont-nécessaires pour observer une différence entre l'Asse et la Durance : Etude de la variabilité des contenus inter-individus

- *Quelle variabilité inter et intra station dans les contenus des tubes digestifs ?*

La Figure 26 montre que la similarité inter-individus selon la distance de Bray-Curtis sur ASSE et D0BIS est semblable avec une moyenne qui vaut 0,2 dans les deux stations. Le calcul et l'affichage des valeurs de la matrice de distances de Bray-Curtis lorsque les contenus de ASSE et D0BIS sont considérés, montre une similarité plus faible avec un indice de Bray Curtis moyen d'environ 0,35, ce qui témoigne d'une différence entre les contenus de ASSE et D0BIS.

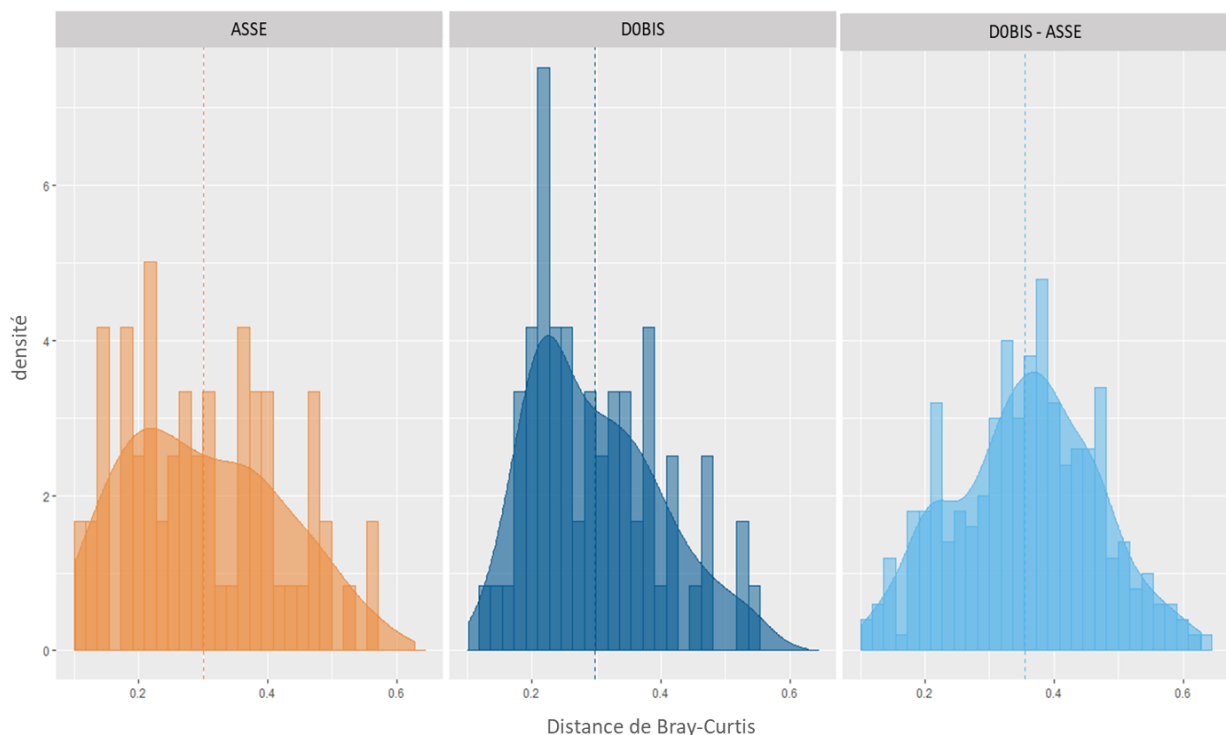


Figure 26 : Histogramme représentant la similarité des contenus inter et intra station

- *A partir de combien d'individus une différence inter-individus inférieure à une différence inter-station est-elle observable : courbe de raréfaction ?*

Une courbe de raréfaction est réalisée pour les contenus d'Oligoneuriella de ASSE et D0BIS Figure 27. L'atteinte d'un plateau montrerait que l'étude de 12 contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella est suffisante pour représenter, avec la méthode d'identification des algues utilisées, ce qu'il est possible de trouver dans les contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella sur les stations d'études de l'Asse et de la Durance.

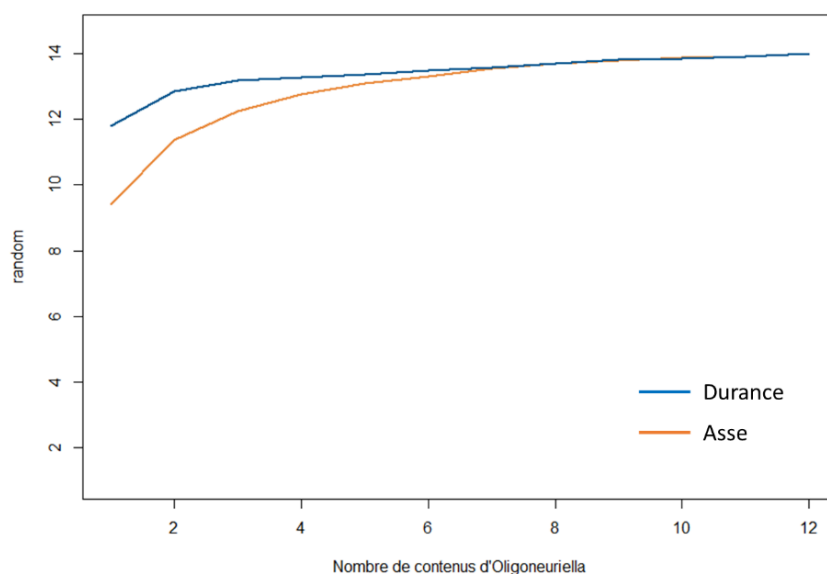


Figure 27 : Courbe de raréfaction sur l'Asse et la Durance

D0BIS est plus riche que ASSE, entre un et sept contenus de tubes digestifs. La stabilisation de la courbe est plus rapide pour D0BIS que ASSE. Cela montre une stabilité plus grande pour D0BIS en terme de richesse taxonomique entre les douze contenus de ASSE et de D0BIS.

La richesse supérieure en Durance a aussi été montrée dans la première partie du chapitre III. Les deux courbes de raréfaction se rejoignent à partir de sept individus. Cela montre une stabilité en terme de richesse taxonomique dans les contenus de l'Asse et de la Durance à partir de l'étude de sept contenus. D'après la Figure 27, il serait possible de travailler sur sept Oligoneuriella pour obtenir une richesse identique dans les contenus de l'Asse et de la Durance.

- *A partir de combien d'individus une différence inter-individus inférieure à une différence inter-station est-elle observable : calcul de l'indice de Shannon ?*

Dans un premier temps l'indice de Shannon est calculé pour l'ensemble des individus. Un algorithme, calcule la moyenne des indices de Shannon pour chaque combinaison possible.

Par exemple il y a 66 combinaisons possibles de prendre 2 individus parmi les 12 disponibles. Pour chacune des paires les 2 indices de Shannon sont moyennés, ce qui donne une liste de 66 indices de Shannon moyen. Le résultat est visible sous la forme d'un boxplot Figure 28.

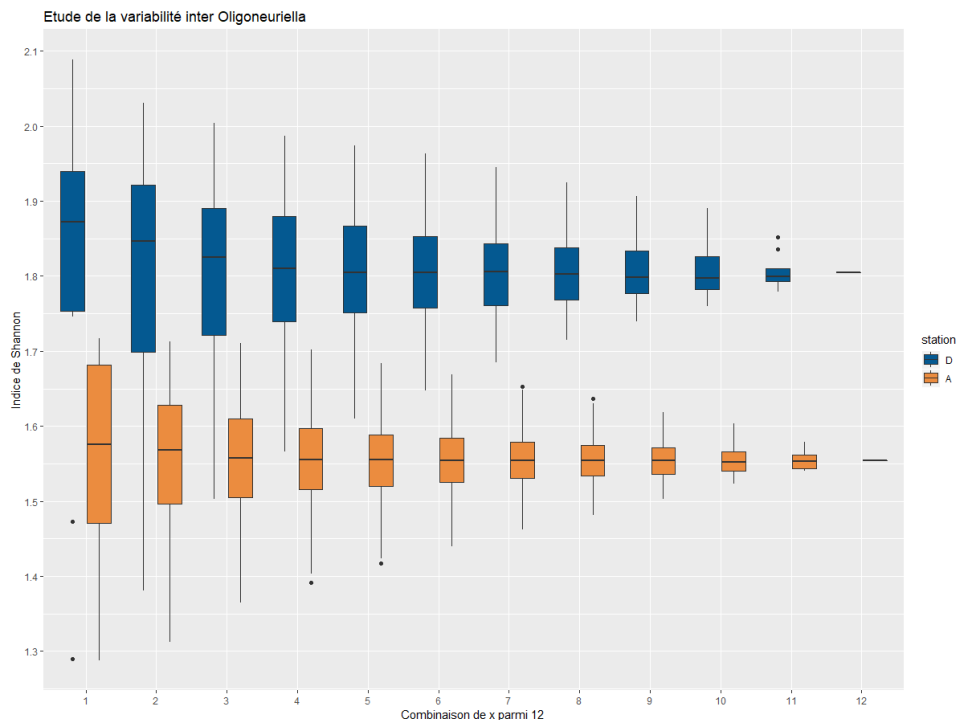


Figure 28 : Variabilité de l'indice de Shannon selon le nombre d'individus étudiées boxplot

Une différence dans l'indice de Shannon est observable quel que soit le nombre d'individus étudiés. Cette différence s'explique par une différence d'abondance d'un même taxon dans les contenus entre l'Asse et la Durance mais aussi par une diversité qui est plus importante en Durance que dans l'Asse.

En résumé,

Les contenus de D0BIS présentent une richesse taxonomique et un indice de Shannon supérieurs à ceux de ASSE. L'étude de douze contenus d'Oligoneuriella semble suffisante pour observer une différence entre les contenus de ASSE et D0BIS. Cependant, les courbes de raréfaction montrent que sept contenus d'Oligoneuriella peuvent représenter la diversité de ASSE et D0BIS.

La réalisation d'une ACP permet d'observer des différences entre la composition des contenus de tubes digestifs des deux stations en projetant les similitudes entre les contenus de tubes digestifs sur deux dimensions.

3) Quelle similarité entre les contenus de tubes digestifs trouvées dans l'Asse puis dans la Durance ?

Une ACP non normée est réalisée Figure 29 sur les relevés des contenus des tubes digestifs. La représentation des dimensions 1 et 2, contribuent à la visualisation de 72,8 % de la variabilité des contenus des tubes digestifs. Cette structuration des contenus de tubes digestif, s'explique par la dominance de certains groupes d'algues dans les contenus de tubes digestifs d'*Oligoneuriella rhenana*. En effet, **GOMP**, **CYMB**, **ACHN**, **AVF** puis **CYA** structurent le jeu de données.

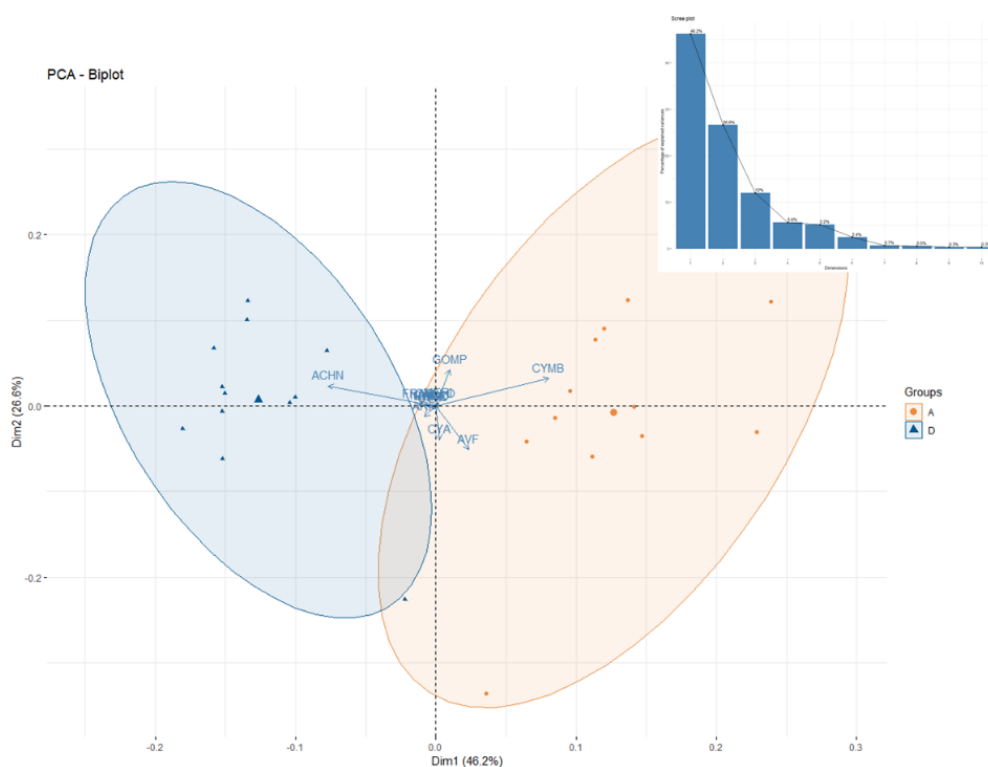


Figure 29 : ACP non normée pour observer les similitudes entre les contenus de tubes digestifs d'*Oligoneuriella* sur l'Asse et la Durance en mai 2016

Le groupe **CYA** est **difficilement interprétable**, les cyanobactéries, dans le cas étudié se présentent sous la forme de longs filaments, ou en amas, qui peuvent être composés de plusieurs centaines de cellules. Cependant le biovolume d'une centaine de cellules est parfois équivalent au biovolume d'une entité de diatomée du groupe **GOMP**.

Par la suite, si leur abondance est importante, leur fréquence dans les contenus des tubes digestifs des *Oligoneuriella rhenana* étudiés est faible. Elles sont présentes dans deux contenus de tubes digestifs avec des abondances relatives de 18 et 73 entités, dans respectivement un contenu de tube digestif de l'Asse et un de la Durance.

L'association de l'ACP Figure 29 et la Figure 30 montrent les dissimilitudes entre les contenus de tubes digestifs de l'Asse et de la Durance en terme d'abondance des groupes d'algues **CYMB** et **ACHN** particulièrement.

Le groupe **ACHN** caractérise les contenus de tubes digestifs de la **Durance** et **CYMB** ceux de l'**Asse**. Par la suite **AFV** semble **légèrement plus dominant** dans les contenus de l'**Asse**. Le groupe **GOMP** domine fortement les contenus de tubes digestifs des stations **ASSE** et **D0BIS**. La significativité des différences pour ces groupes d'algues entre la station de l'Asse et de la Durance est testée Figure 30.

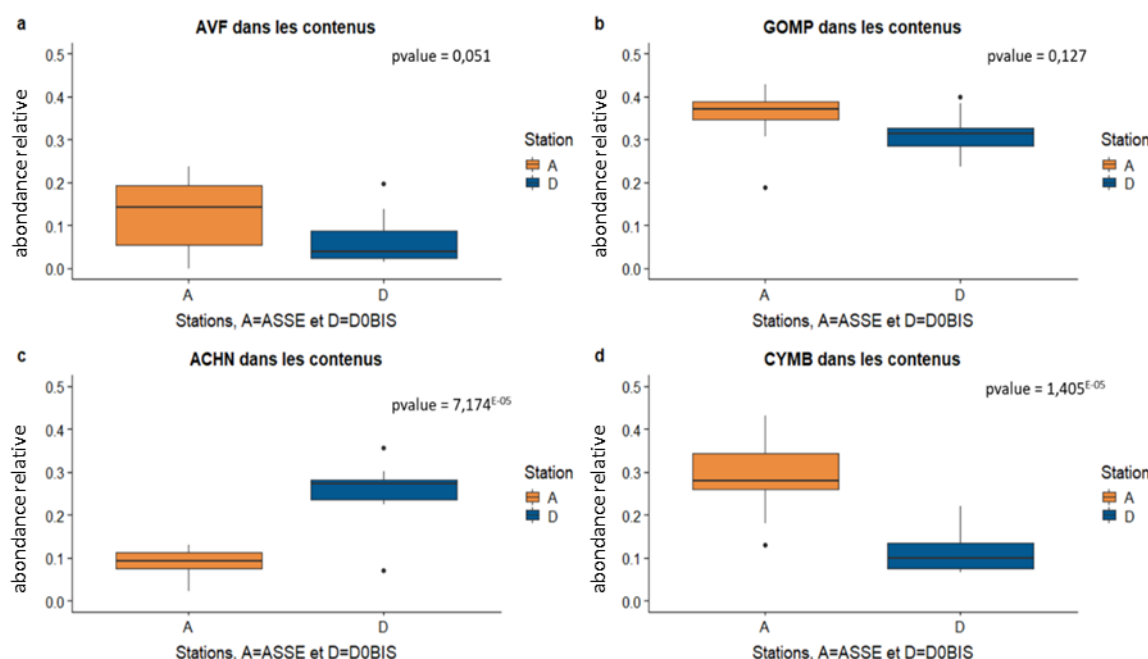


Figure 30 : Comparaison des proportions des groupes d'algues -a. AVF -b.GOMP -c.ACHN -d.CYMB entre les contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella de l'Asse et de la Durance en mai 2016

L'hypothèse nulle supposant que la différence moyenne d'abondance relative des groupes d'algues **AVF**, **GOMP**, **ACHN**, et **CYMB** est identique dans les contenus de tubes digestifs de **ASSE** et **D0BIS** est testé avec le test de Wilcoxon. La différence entre l'abondance relative moyenne des groupes d'algues **CYMB**, **ACHN** et **AVF** entre **ASSE** et **D0BIS** est significative, avec des p-values respectives de $7,174 \times 10^{-5}$, $1,405 \times 10^{-5}$ et 0,051.

Bilan :

Il y a une différence entre les contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella de l'Asse et de la Durance en mai 2016. Cette dissimilitude est principalement liée à des proportions significativement différentes d'Achnanthidium – Achnanthes (**ACHN**) et Cymbella – Encyonema – Cymbopleura – Amphora (**CYMB**) dans les contenus. **ACHN** domine dans les contenus de la Durance et **CYMB** dans les contenus de l'Asse.

Pour l'ensemble des interprétations, il est intéressant de prendre en considération qu'à partir de 7 contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella, la richesse taxonomique qu'il est possible de trouver dans un contenu de tube digestif d'une station est relativement stable. Par la suite douze contenus d'Oligoneuriella rhenana semblent nécessaires pour montrer une différence entre les contenus de tubes digestifs de l'Asse et ceux de la Durance.

La question qui se pose maintenant est : est-ce que ces différences sont liées à des proportions en algues différentes présentes entre les deux stations ? En d'autres termes, Oligoneuriella est-elle sélective dans sa consommation en phytobenthos ?

4) *Oligoneuriella rhenana* est-elle sélective dans sa consommation en phytobenthos ?

- Présentation des différences entre la liste de groupes d'algues du terrain et des contenus de tubes digestifs

Les densités cellulaires des algues du relevé de phytobenthos sur ASSE et D0BIS sont visibles Figure 31, le graphique représentant les abondances relative se trouve en Annexe 6.

La comparaison des listes d'algues dans les contenus et dans le relevé de phytobenthos ne montre aucune différence pour les **algues rouges filamenteuses**.

La présence de quatre groupes d'algues dans les contenus mais pas dans le phytobenthos pour les **algues vertes filamenteuses** **CHAET** et **OEDO** (dans un contenu), **SPIRO** et **ULOT** (dans respectivement 13 et 3 contenus différents). **CLADO** s'observe seulement dans le relevé de terrain en D0BIS, cette algue est absente des contenus de tubes digestifs d'*Oligoneuriella rhenana* en 2016.

Les **algues vertes unicellulaires** se distinguent avec la présence de **CHLA** (une fois dans un contenu), **CLOS** (dans 4 contenus), **SCENE** dans un contenu et **STAU** (dans 3 contenus), ces groupes d'algues se trouvent dans les contenus d'*Oligoneuriella* mais pas dans le relevé de terrain. D'autres part, **CHRYSOC** se trouve sur ASSE dans le phytobenthos mais n'a pas été observé dans les contenus.

Les **diatomées** du relevé de phytobenthos présentent des algues qui n'ont pas été retrouvées dans les contenus : **AMPH** et **DENT** sur l'ASSE, **CALO**, **CYMA**, **EUCO**, **EUNO**, **GYRO**, **HIPP**, **REIM** sur D0BIS et **BRAC**, **PENNE**, **SURI** sur les deux stations. De plus **DIDY** est présente dans le phytobenthos exclusivement en D0BIS. Ce groupe d'algues correspond à la diatomée invasive *Didymosphenia*, qui n'a pas été observée lors de nos analyses dans les contenus d'*Oligoneuriella* en mai 2016.

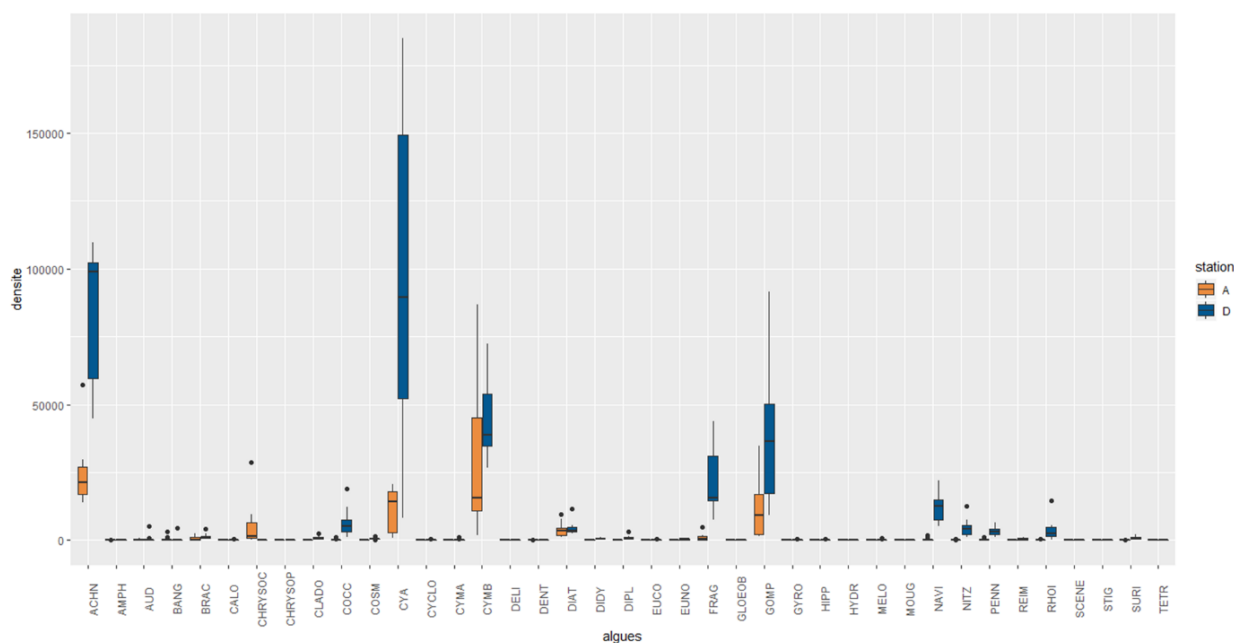


Figure 31 : Présentation du relevé de phytobenthos de 2016 sur ASSE (A) et D0BIS (D) dans les trois ambiances de vitesse en densité cellulaire (cellule/cm²)

- *Oligoneuriella* consomme-t-elle au prorata de ce qui se trouve dans le milieu ?

Dans un premier temps, il s'agit de regarder si la différence entre les contenus de tubes digestifs de l'Asse et de la Durance est liée à la différence entre la proportion de ces mêmes groupes d'algues dans le milieu. La Figure 32 montre l'abondance relative d'**ACHN**, **CYMB** et **GOMP** sur ASSE et D0BIS dans les contenus et dans le relevé de phytobenthos.

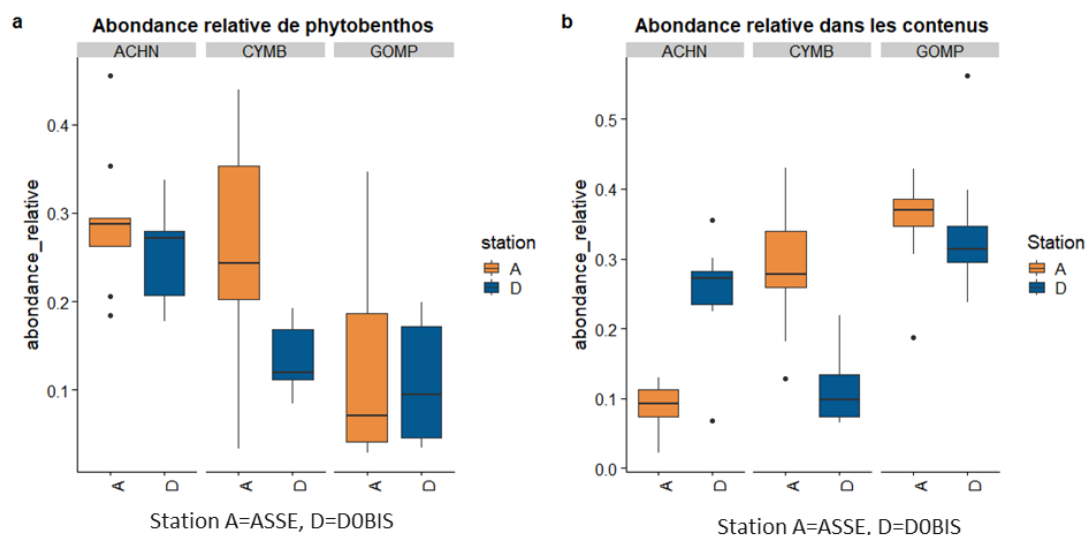


Figure 32 : Comparaison des abondances relatives en algues entre ASSE (A) et D0BIS (D) dans le relevé de phytobenthos et dans les contenus digestifs de *Oligoneuriella* en mai 2016

La différence entre les abondances relatives des groupes **ACHN**, **GOMP** et **CYMB** entre l'Asse et la Durance sur le terrain est comparée aux différences entre les contenus de tubes digestifs Tableau 4.

Tableau 4 : Différence de proportions pour **GOMP**, **CYMB** et **ACHN** dans le phytobenthos et dans les contenus de tubes digestifs

	Moyenne Contenus ASSE	Moyenne Contenus D0BIS	Contenus ASSE – Contenus D0BIS	Moyenne phytobenthos ASSE	Moyenne phytobenthos D0BIS	Phytobenthos ASSE – phytobenthos D0BIS	Contenus- phytobenthos
ACHN	0,09	0,25	0,17	0,29	0,26	0,03	0,14
CYMB	0,29	0,12	0,17	0,26	0,14	0,13	0,04
GOMP	0,36	0,33	0,02	0,13	0,11	0,02	0

La différence d'abondance relative de **ACHN** entre ASSE et D0BIS est environ cinq fois plus importante dans les contenus que dans le relevé de phytobenthos. Cette tendance n'est pas observée pour **CYMB** et **GOMP** où la différence d'abondance relative entre ASSE et D0BIS est semblable dans les contenus et dans le relevé de phytobenthos Tableau 4.

Cette différence entre le phytobenthos et les contenus pour **ACHN** montre une différence de consommation de cette algue par *Oligoneuriella rhenana* selon la station. Par la suite ces résultats suggèrent qu'*Oligoneuriella* consomme au prorata de ce qui se trouve dans le milieu en ce qui concerne les groupes de diatomées **CYMB** et **GOMP**.

La Figure 32 montre une densité de **ACHN** plus grande en D0BIS que sur ASSE. Ainsi, la différence entre la proportion de **ACHN** dans les contenus de l'Asse et de la Durance s'expliquerait par une différence de densité beaucoup plus forte pour **ACHN** entre les deux stations ce qui augmenterait

fortement la probabilité de capture de cette algue par les invertébrés. Une autre hypothèse serait une préférence d'*Oligoneuriella rhenana* pour **CYMB** qui est en plus grande proportion sur ASSE.

En résumé, les différences entre l'Asse et la Durance sont semblables sur le relevé de phytobenthos et dans les contenus pour Gomphonema (**GOMP**) et Cymbella – Encyonema – Cymbopleura – Amphora (**CYMB**). Ce qui montre que les différences observées entre les contenus d'*Oligoneuriella* en 2016 sur ASSE et D0BIS s'expliquent par les différences d'abondances relatives du phytobenthos sur les deux stations.

De plus pour **GOMP** et **CYMB** l'abondance relative dans les contenus est supérieure ou semblable à celle trouvée dans le relevé de phytobenthos. Cette observation pose la question de la sélectivité d'*Oligoneuriella* vis-à-vis de certaines algues, c'est l'objet de la partie qui suit. La réponse à cette question permettrait d'expliquer les tendances observées avec **ACHN**.

- *Utilisation de l'indice linéaire de Strauss pour étudier la sélectivité*

Afin de confirmer la sélectivité pour certains groupes d'algues, la différence entre l'abondance relative des différents groupes d'algues dans le milieu naturel est comparée à celle trouvée dans les contenus pour l'Asse et la Durance, Figure 33.

Un indice de Strauss > 0.01 sera considéré comme positif et signifie qu'*Oligoneuriella* aurait tendance à sélectionner ce groupe d'algues. A l'inverse, un indice de Strauss < 0.01 sera considéré comme négatif et suggère une non-sélection, et même un évitement de ce groupe d'algues (Maasri et al., 2010). Afin de faciliter l'analyse des résultats, la Figure 33 représente uniquement les groupes d'algues pour lesquels l'indice de Strauss médian est compris entre $+ 0.01$ et $- 0.01$, cette sélection est faite par lecture graphique à partir de l'Annexe 7 où l'ensemble des groupes d'algues sont représentés.

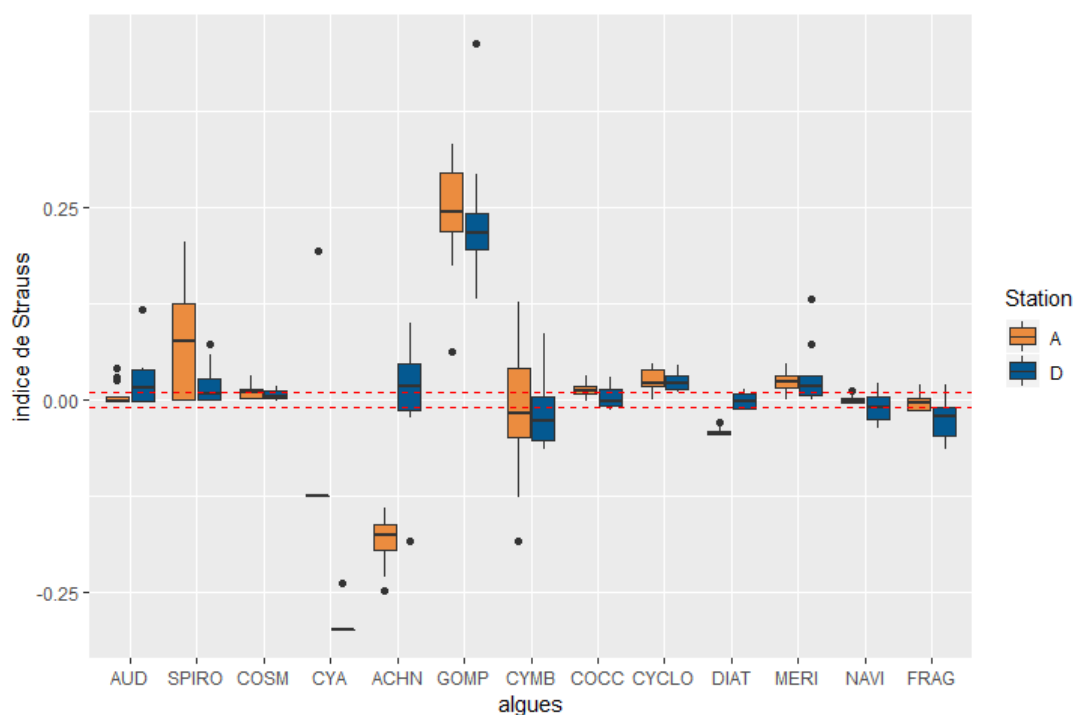


Figure 33 : Calcul de l'Indice de Strauss pour les principale algues présentes dans les contenus pour *Oligoneuriella* en Mai 2016, les lignes rouges représentent la valeur $+ 0.01$ et $- 0.01$

A partir de la Figure 33 peuvent se distinguer quatre catégories d'algues, les non-consommées, les exclusives, les sélectionnées et celles pour lesquelles il est difficile de conclure.

Les **non-consommées** sont les algues qui se distinguent par leur présence sur le terrain mais non présentes dans les contenus. Leur abondance relative sur le terrain est telle que l'indice de Strauss médian qui leur est associé est inférieur à 0,01. Aucune algue ne se distingue dans cette catégorie pour *Oligoneuriella* en Mai 2016.

Les **exclusives** représentent les algues qui sont présentes dans les contenus avec un indice de Strauss médian supérieur à 0.01 mais qui n'ont pas été retrouvées dans le relevé de terrain. Dans ce cas c'est la proportion de l'algue entre les contenus de ASSE et D0BIS qui est comparée. Il s'agit de l'algue verte filamenteuse **SPIRO** et de la diatomée **MERI**. Une tendance montre un indice de Strauss pour **SPIRO** supérieur dans ASSE. L'hypothèse (H_0) d'égalité des moyennes entre ASSE et D0BIS pour **SPIRO** est testée avec le test de Wilcoxon. La pvalue est de 0,12 > 5 % ce qui valide H_0 . La différence entre ASSE et D0BIS pour **SPIRO** n'est pas significative. Il en est de même pour **MERI** avec une pvalue de 0,42.

Les **sélectionnées** sont les algues présentes sur le terrain et dans les contenus dont l'indice de Strauss médian est supérieur à 0,01, sur les stations ASSE et D0BIS. Le groupe d'algues **GOMP** a un indice de Strauss médian qui est supérieur à 0,18, ce qui montre une sélection d'*Oligoneuriella* pour ce groupe d'algues. Un taux de sélection plus faible est aussi observable pour les groupes **COCC**, **CYCLO** en ce qui concerne les diatomées, **COSM** pour les algues vertes unicellulaires, et **AUD** pour les algues rouges filamenteuses. De plus, la similarité entre ASSE et D0BIS pour ces groupes d'algues (H_0) est testée avec le test Wilcoxon. L'indice de Strauss des groupes d'algues **GOMP** (pvalue = 0,21), **COCC** (pvalue = 0,08), **CYCLO** (pvalue = 0,58) et **COSM** (pvalue = 0,4), valide H_0 , la différence entre ASSE et D0BIS n'est pas significative. L'indice de Strauss de **AUD** est significativement différent entre ASSE et D0BIS avec une pvalue de 0,005.

Les groupes **ACHN** et **CYMB**, sont importants dans la structure des contenus de tubes digestifs d'*Oligoneuriella*. Le test de Wilcoxon donne une pvalue < 0,001 pour **ACHN** et une pvalue = 0,84 pour **CYMB**. La différence d'indice de Strauss est significative entre ASSE et D0BIS pour **ACHN** mais pas pour **CYMB**.

CYMB à un indice de Strauss médian négatif sur ASSE et D0BIS. Cependant pour ASSE le troisième quartile est supérieur à 0.01, ce qui signifie par lecture graphique qu'environ 12,5 % des valeurs d'indices de Strauss calculés pour **CYMB** dans cette condition sont supérieures à 0.01.

ACHN est sélectionné en D0BIS, l'indice de Strauss médian est positif. Des observations qui peuvent laisser supposer une préférence pour **CYMB** lorsqu'elle est présente avec une abondance relative plus importante dans un milieu. De plus, si la proportion d'**ACHN** est similaire dans les deux milieux, la densité cellulaire est cependant plus importante en Durance Figure 32, ce qui peut augmenter la probabilité de capture et expliquer la différence entre les valeurs d'indices de Strauss de ASSE et D0BIS

Comme il a été dit précédemment les choix faits dans la méthodologie d'identification des algues dans les contenus rendent difficile l'analyse des indices de Strauss obtenus pour **CYA**. Cependant, il est quand même possible de dire que **CYA** est retrouvé exclusivement en D0BIS dans les contenus, mais l'occurrence et l'abondance relative de **CYA** dans les contenus sont très négligeables en face des proportions retrouvées sur le terrain. La méthode que nous avons employée montrerait que **CYA** est évitée par *Oligoneuriella* en mai 2016. Le test de Wilcoxon montre une différence significative entre les stations ASSE et D0BIS (pvalue < 0,001).

Bilan,

Les contenus de tubes digestifs sont principalement structurés par Achnanthidium - Achnanthes (**ACHN**), Cymbella – Encyonema – Cymbopleura – Amphora (**CYMB**), Gomphonema (**GOMP**) et les Algues vertes filamenteuses (**AVF**). La proportion d'**ACHN** domine dans les contenus de tubes digestifs en Durance et **CYMB** sur l'Asse. La comparaison des différences des abondances relatives entre ASSE et D0BIS pour ces algues montre que les différences de proportion de **CYMB** et **GOMP** dans les contenus se justifient par la différence de proportion dans les relevés de phytobenthos des deux stations. Cette explication ne vaut pas pour **ACHN**. Par la suite le calcul de l'indice de Strauss montre une sélection pour **GOMP** sur l'Asse et la Durance, et pour **ACHN**, en Durance.

Les questions qui se posent à la suite de ce travail exploratoire sont : la similarité entre les contenus est-elle variable selon le taxon, l'année, la station ? Qu'en est-il de la sélectivité ?

IV- PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS : ETUDE DES CONTENUS SELON LE TAXON, L'ANNEE et LA STATION DE MACROINVERTEBRES

Les données à disposition pour cette partie sont présentées dans le **Tableau 2** de la partie méthode.

1) Similarité des contenus selon la station l'année et le taxon de macroinvertébrés

a. Présentation des contenus de tubes digestifs

La Figure 34, montre la diversité de la composition des contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella, Ecdyonurus et Ephemerella sur l'Asse et la Durance en mai 2015, 2016 et 2017. Les abondances totales des algues dans l'ensemble des contenus et leurs occurrences sont présentées en Annexe 8.

Trois contenus de tubes digestif ont un nombre total d'entités inférieur à 200 (Figure 34), alors que la limite de comptage était fixée à 400. Ainsi, ces individus, comme justifié dans la partie méthodologie, sont supprimés des analyses. Au total **trois individus** sont retirés (deux Ecdyonurus en 2017 et une Ephemerella en 2017).

Tout comme dans l'étude des contenus d'Oligoneuriella en mai 2016, les fragments de diatomées dominant l'ensemble des contenus des tubes digestifs. Les fragments de diatomées sont majoritaires dans les contenus d'Oligoneuriella, Ephemerella et Ecdyonurus quelles que soient l'année ou la station.

A seconde vue, certains groupes d'algues comme **GOMP**, **ACHN**, **CYMB** semblent être présents de manière dominante dans l'ensemble des contenus de tubes digestifs.

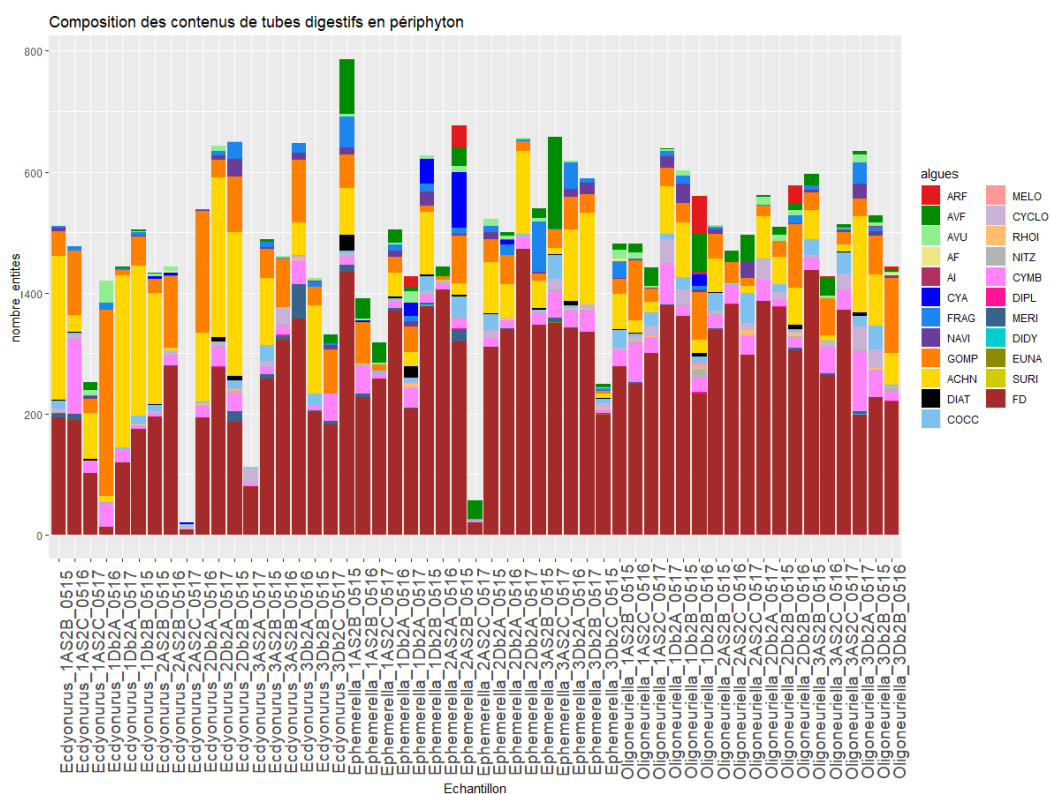


Figure 34 : Présentation des contenus de tubes digestifs étudiés

Afin de mieux visualiser les similitudes entre les contenus, les **FD** sont retirés du jeu de données pour réaliser la Figure 35. Cet histogramme permet de comparer les compositions des 53 tubes digestifs selon le taxon de macroinvertébré étudié, l'année et la station.

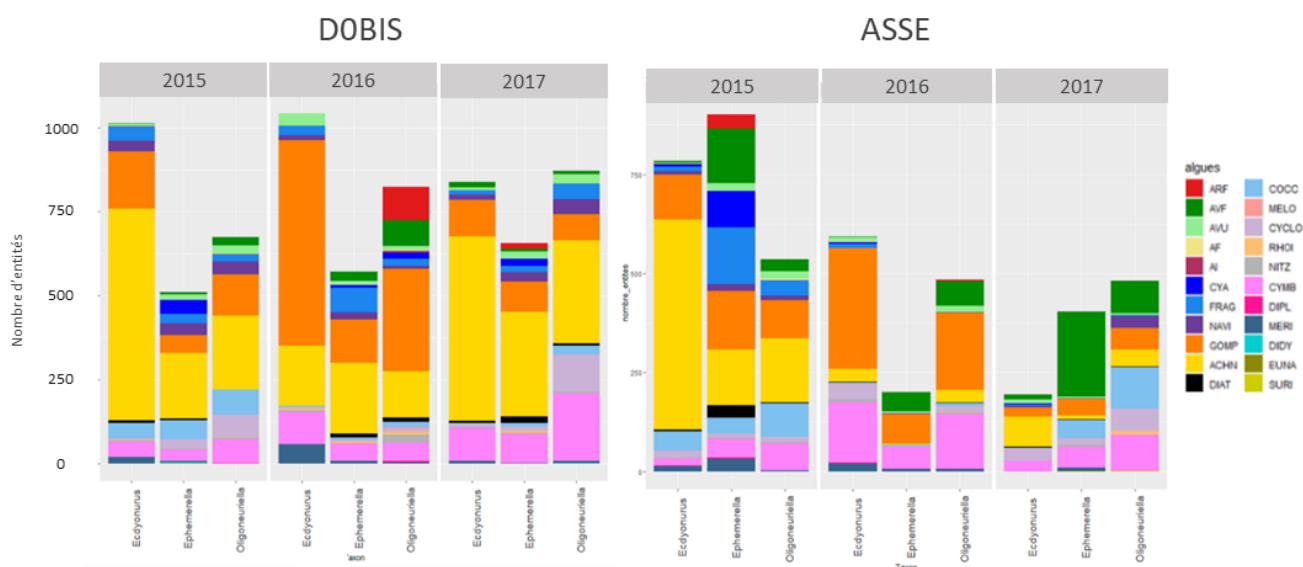


Figure 35 : Présentation du cumul contenus de tubes digestifs par station selon l'année et le taxon

La Figure 35 montre la présence de **ANCH**, **CYMB** et **GOMP** en grande abondance dans l'ensemble des contenus, relativement aux autres groupes d'algues considérés sur cette figure. Les AVF et ARF semblent dominantes chez Ephemerella et Oligoneuriella.

Les **algues rouges filamenteuses** sont représentées par **Bangia** et **Audouinella**, Bangia étant trouvée dans seulement un contenu.

Les **algues vertes filamenteuses** se composent des entités présentées Figure 36. Les algues vertes filamenteuses non déterminées sont dominantes. Parmi les algues vertes filamenteuses identifiables, il y a une dominance de **Spirogyra** et **Ulothrix**, ce qui peut suggérer que ce sont ces algues qui composent les algues vertes indéterminées. La présence d'**Oedocladium**, d'**Oedogonium** et de **Chaetophora** est relativement rare puisque ces algues ont une occurrence respective dans les contenus de 2,1 et 1.

Les **algues vertes unicellulaires**, sont représentées en majorité par **Cosmarium**, suivi par **Staurastrum**, puis les algues non déterminables. La présence de **Oocystis**, **Closterium**, **Scenedesmus** et **Chlamydomonas** est rare. En effet ces algues ont une occurrence respective dans les contenus de 4,4,2 et 2.

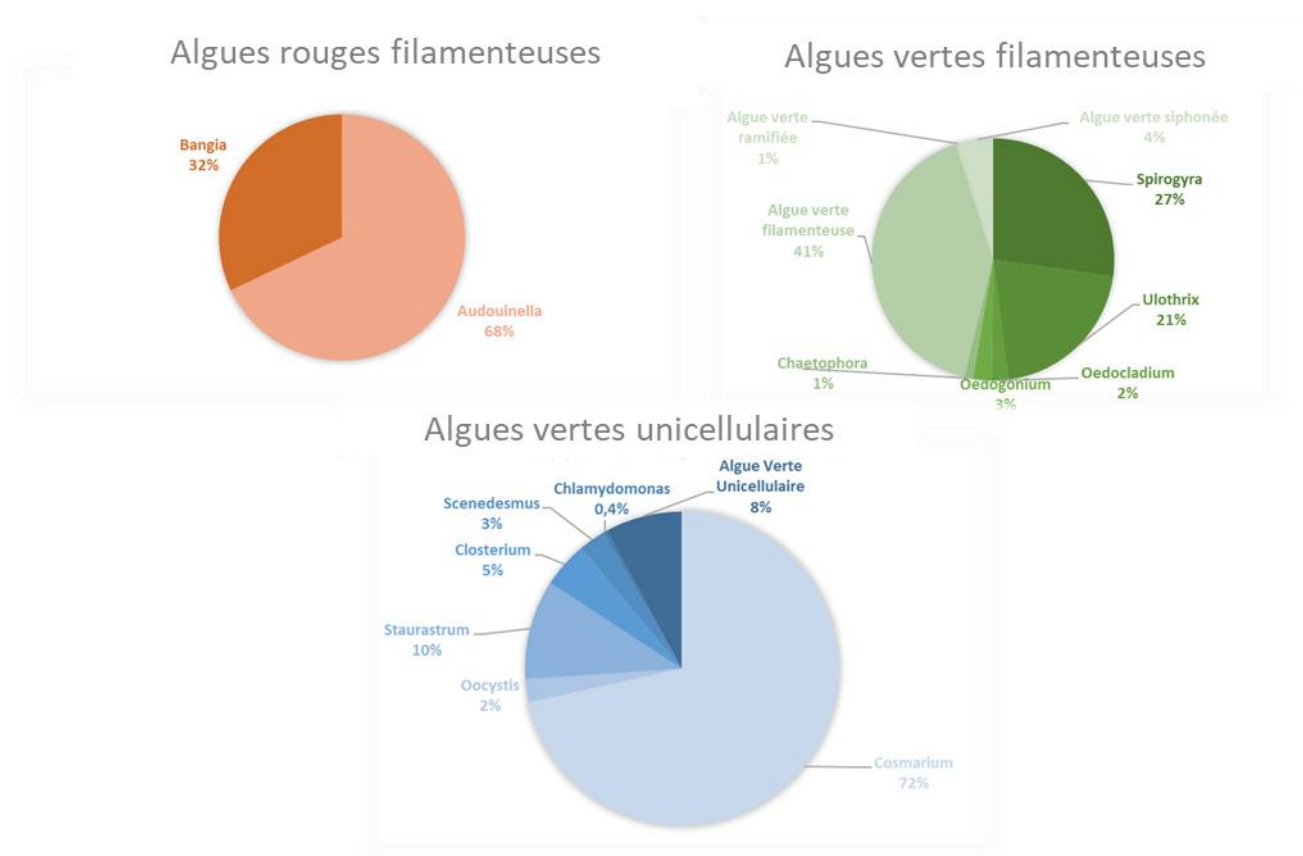


Figure 36 : Composition des groupes Algues rouges filamenteuses (ARF), Algues vertes filamenteuses (AVF) et Algues vertes unicellulaires (AVU) présents dans le cumul des contenus de tubes digestifs

b. Etude des singularités au sein de ces contenus : Analyse Factorielle des Correspondances

L'analyse factorielle des correspondances permet d'observer les relations entre variables. Cette analyse met en évidence les singularités du jeu de données. La Figure 37 présente les résultats de l'AFC dans les dimensions 1, 2 et 3 sous forme d'un biplot en présentant les macroinvertébrés étudiés et les variables algues. Les dimensions 1 et 2 représentent seulement 42,9 % de la variabilité, par conséquent la dimension 3 (16.1%) est aussi regardée.

L'AFC dans les dimensions 1 et 2 montre que **AVF**, **CYA** et les **ARF** contribuent fortement à la formation des axes 1 et 2. Le groupe **CYA** est présent uniquement dans les contenus de tubes digestifs d'Oligoneuriella et Ephemerella. **ARF** est aussi présent chez ces deux macroinvertébrés, d'où la proximité des deux groupes sur la Figure 38.

Les **AVF** contribuent à la formation de la dimension 1. Ce groupe est présent particulièrement chez Oligoneuriella, 286 entités et Ephemerella, 443 entités, contre 38 entités comptabilisées chez Ecdyonurus.

ACHN contribue également à la formation de la dimension 1, ce groupe d'algues est proche de Ecdyonurus, il est dominant dans ses contenus, 1998 entités comptabilisées contre 861 entités et 888 entités dans les contenus de Ephemerella et Oligoneuriella.

Un effet station se dégage, de cette AFC : à droite, des contenus de l'Asse et à gauche, une majorité de contenus de la Durance. En effet les deux groupes d'algues structurant la dimension sont dans des abondances différentes sur l'Asse et la Durance. **AVF** domine sur l'Asse avec 442 entités comptées contre 173 entités en Durance. **ACHN** domine en Durance avec 20 740 entités identifiées face à 1 209 entités dans les contenus de l'Asse.

L'AFC dans les dimensions 2 et 3 met en évidence un effet de l'année dans la composition des contenus des tubes digestifs. Les contenus de tubes digestifs de 2017 se trouvent en haut de l'analyse et ceux de 2016 vers le bas.

Une structuration selon le taxon de macroinvertébrés est aussi visible. Sur la dimension 2, AVF se regroupe avec Ephemerella et Oligoneuriella. A l'opposé, **GOMP** se regroupe avec Ecdyonurus.

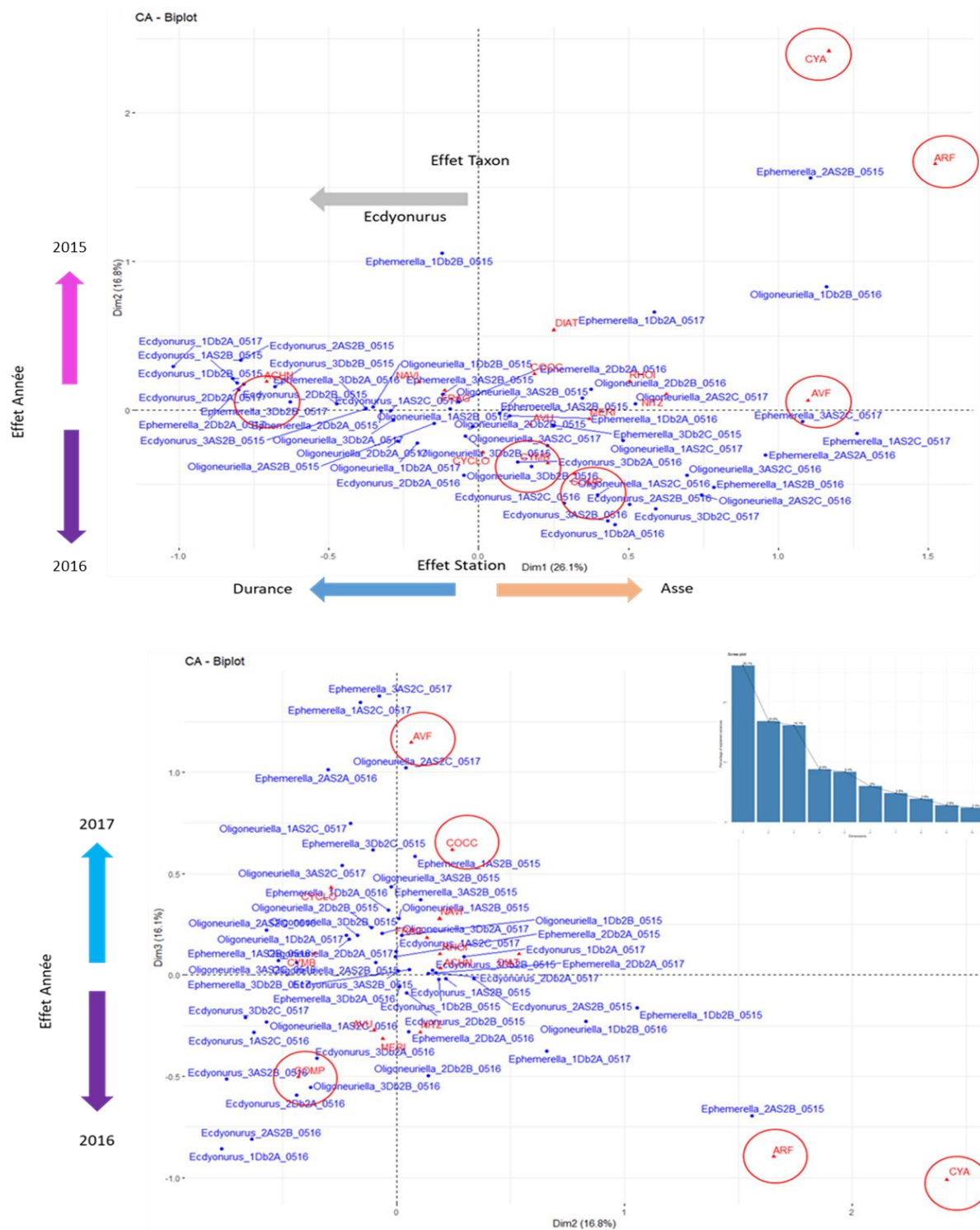


Figure 37 : Analyse Factorielle des Correspondances : projection sur les dimensions 1,2 et 3

La Figure 38, colore les macroinvertébrés selon les variables « environnementales » qui les caractérisent. Elle permet de visualiser les effets stations, années et taxons. Les contenus de l'année 2016 se distinguent de ceux de 2015 et 2017 notamment dans les dimensions 2 et 3. Dans les dimensions 1 et 2 Ecdyonurus se distingue d'Oligoneuriella et Ephemerella. Une différence entre les barycentres de l'Asse et de la Durance se distingue légèrement dans les dimensions 1 et 2.

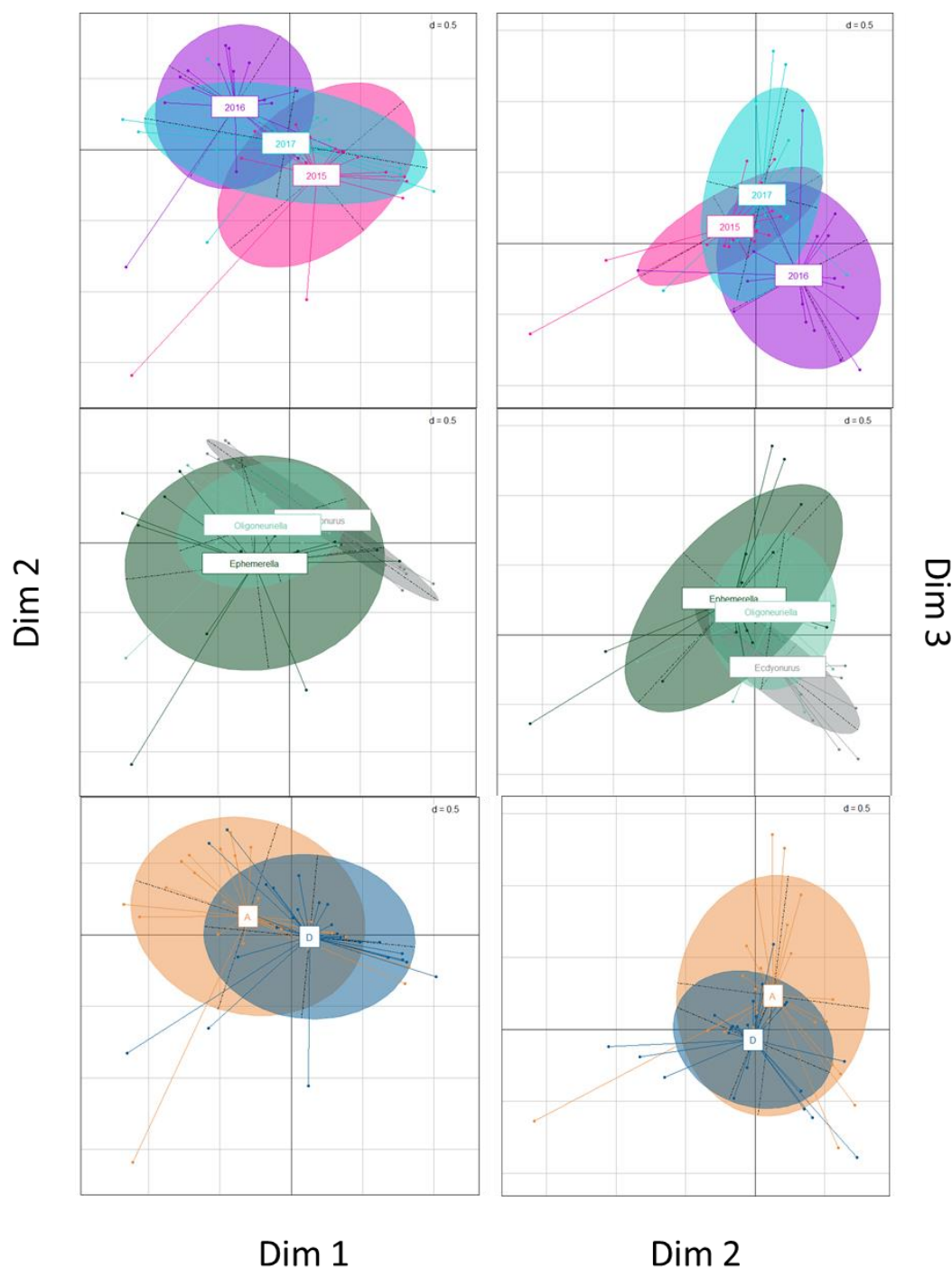


Figure 38 : Visualisation des effets taxon, station et année dans la structure des contenus de tubes digestifs

Au total, la réalisation de l'AFC permet de mettre en évidence les singularités présentes dans les compositions algales des contenus des tubes digestifs. Les cyanobactéries (CYA), les algues vertes filamenteuses (AVF), les algues rouges filamenteuses (ARF) sont des singularités du jeu de données « contenus de tubes digestifs ».

- c. Etude des similitudes entre les contenus des tubes digestifs : analyse en composantes principales (ACP) et analyse de redondances (RDA)

La réalisation d'une ACP sur la proportion de chacun des groupes d'algues dans les contenus, montre une structuration du jeu de données par les groupes **ACHN**, **GOMP** et **COCC** pour les diatomées et **AVF** Figure 39. Ce qui ressort de ces analyses est :

Un léger **effet station** : la Durance se distingue par la variable **ACHN** et l'Asse par les variables **AVF** et **CYMB**.

Tout comme sur l'AFC l'**année** 2016 se distingue de 2015 et de 2017 : la proportion de **GOMP** dans les contenus serait plus importante pour 2016.

Des similitudes entre les contenus se distinguent selon le taxon : **GOMP** et **ACHN** dominent dans les contenus de Ecdyonurus, tandis que Ephemerella et Oligoneuriella présentent des contenus dont la composition algale est plus variée.

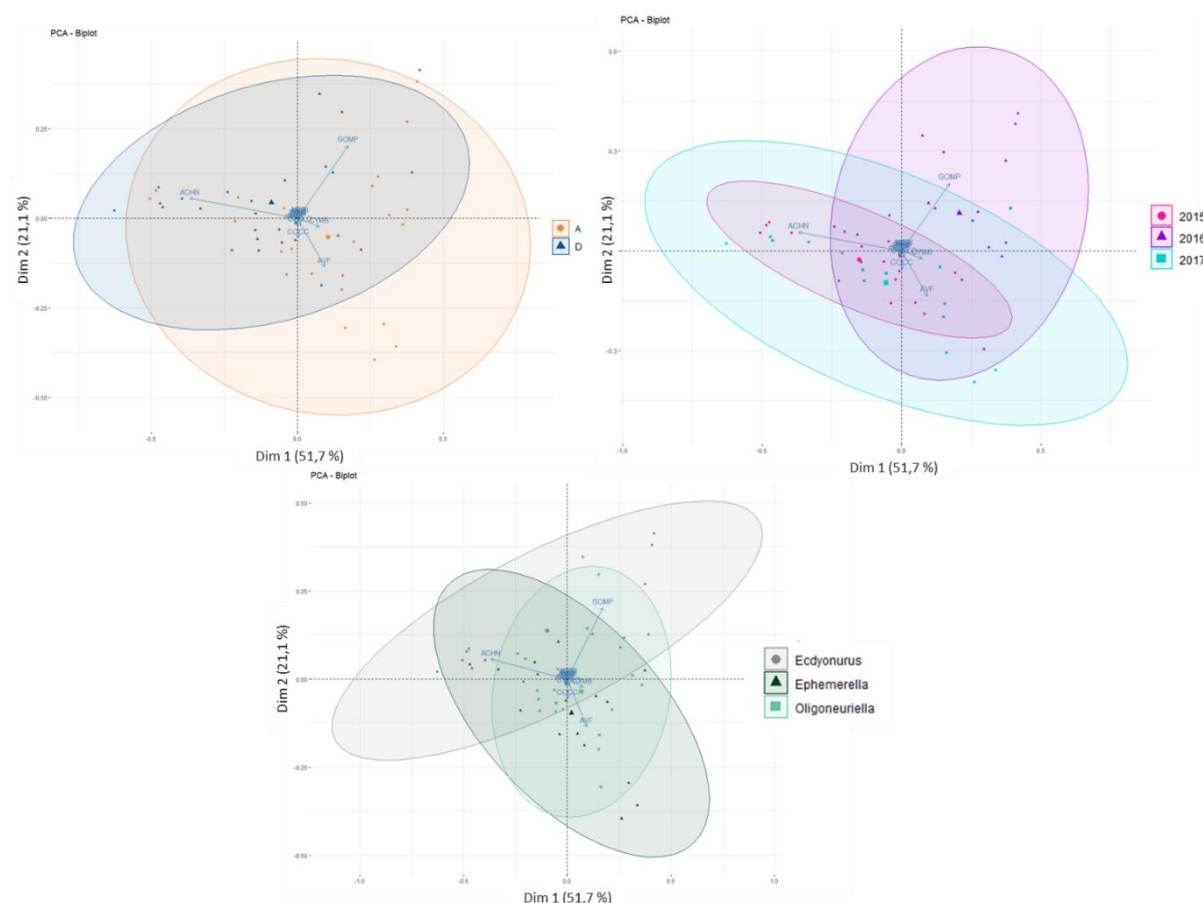


Figure 39 : Résultat de l'ACP, visualisation des résultats en affichant les barycentres des variables station, année et taxon

La réalisation d'un RDA présenté Figure 40, permet d'expliquer les variations observées entre les contenus de tubes digestifs étudiés. Des corrélations sont visibles entre **AVF** et les variables explicatives ASSE (StationA sur la Figure 40), Oligoneuriella et Ephemerella. En face, se distingue une corrélation entre **ACHN** et la station D0BIS (StationD sur la Figure 40). Ecdyonurus s'associe aux variables **ACHN** et **GOMP**. L'année 2016 se détache de 2015 et 2017, par une proportion plus importante de **GOMP** dans les contenus.

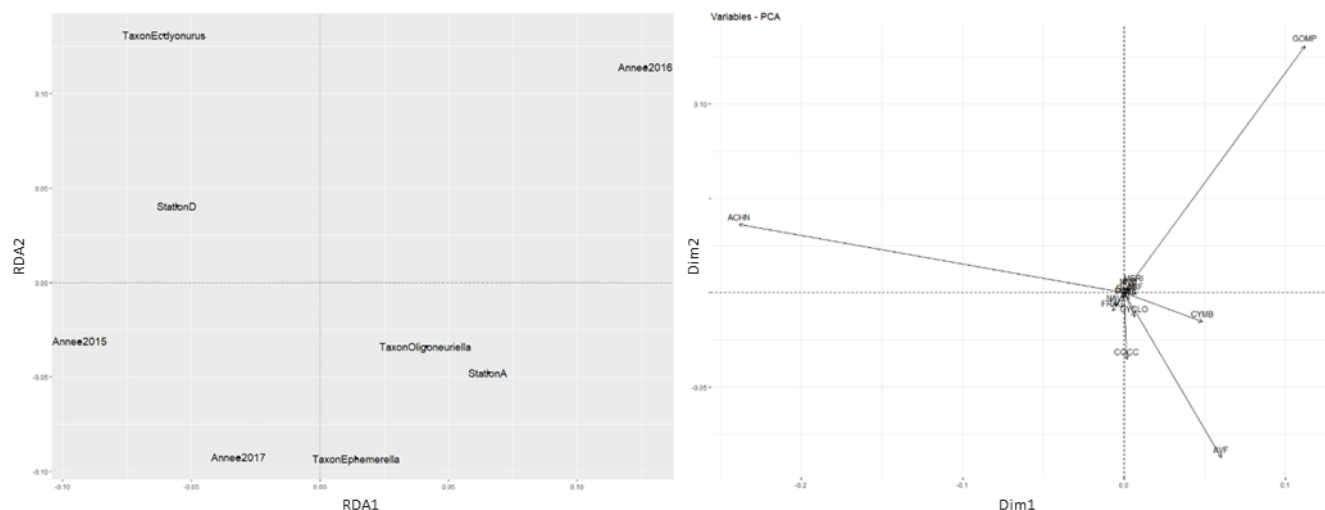


Figure 40 : A gauche : représentation des centroïdes des variables environnementales explicatives sur les axes 1 et 2 de la RDA ; A droite : représentation des variables quantitatives structurant les contenus de tubes digestifs après réalisation de l'ACP

La significativité de ces différents effets est évaluée avec une permanova dont les résultats sont présentés Tableau 5. Les effets années, stations et taxons sont significatifs dans les différences entre contenus de tubes digestifs. Cependant les interactions entre les variables environnementales sont significatives. Ainsi, la différence entre les contenus selon l'année dépend de la station, du taxon, et la différence entre l'Asse et la Durance dépend du taxon.

Tableau 5: Permanova, significativité des effets stations, années et taxons sur les dissimilarités entre contenus de tubes digestifs

	Df	Variance	F	Pr(>F)
Année	2	0,34	14,05	0,001***
Station	1	0,013	10,64	0,001***
Taxon	2	0,016	6,68	0,001***
Année : Station	2	0,007	3,20	0,01 **
Année : Taxon	2	0,014	2,88	0,004**
Station : Taxon	2	0,006	2,50	0,034 *
Résiduel	36	0,04		

Bilan :

Achnanthidium – Achnanthes (**ACHN**), Gomphonema (**GOMP**), Cymbella – Encyonema – Cymbopleura – Amphora (**CYMB**), Cocconeis (**COCC**) et les Algues vertes filamenteuses (**AVF**) sont les algues principalement retrouvées dans les contenus. Les contenus de l'année 2016 se distinguent des contenus de 2015 et 2017 avec une proportion plus importante de GOMP dans leurs contenus.

Ecdyonurus possède une majorité de **GOMP** et **ACHN**, tandis que les contenus d'Oligoneuriella et Ephemerella sont plus diversifiés, avec une proportion plus importante d'**AVF** chez Ephemerella.

La différence entre les contenus de l'Asse et de la Durance est notable, avec une domination d'**ACHN** dans les contenus en Durance.

Ces effets taxon, année, station sont significatifs et interagissent entre eux. A la différence de régime alimentaire entre le taxon de macroinvertébrés, une attention particulière est portée sur la significativité de l'interaction entre les effets années et stations, cette interaction pose la question de l'effet de l'hydrologie sur la dynamique de l'interaction phytobenthos et macroinvertébrés.

L'ensemble de ces variations dans les contenus, peut s'expliquer par la variabilité des algues sur le terrain qui sera analysée dans la partie ci-dessous.

2) Les trois Ephéméroptères étudiés sont-ils sélectifs dans leur consommation en phytobenthos ?

• Etude du relevé de phytobenthos

Les groupes d'algues structurant les contenus de tubes digestifs sont extraits du relevé de phytobenthos et affichés Figure 41 selon l'année et la station. Comme dans les contenus, **GOMP** se trouve avec une abondance relative plus importante sur le terrain en 2016. **ACHN** domine en D0BIS seulement pour les années 2015 et 2017. Dans l'ensemble, comme dans les contenus, les différences inter-années du relevé de phytobenthos semblent aussi importantes que les différences inter-stations.

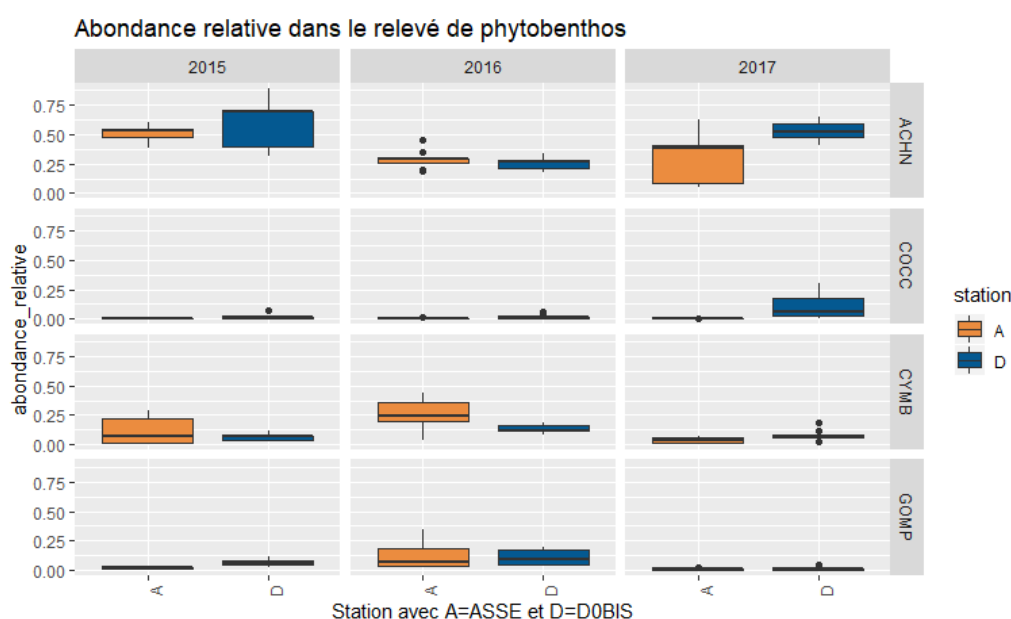


Figure 41 : Abondance relative des groupes d'algues ACHN, GOMP, COCC et CYMB dans le relevé de phytobenthos

L'étude de l'ensemble du jeu de données « phytobenthos – contenus » montre que comme dans le chapitre III certaines algues sont présentes dans les contenus et absentes du relevé de terrain et inversement. Les **algues vertes filamenteuses CHAET, OEDO, OEDOG** présentes dans un contenu, puis **SPIRO** et **ULOT** présentes dans respectivement 18 et 6 contenus, sont identifiées dans les contenus mais absentes du relevé de phytobenthos.

A l'inverse **CLADO, MOUG** et **STIG** sont présentes sur le terrain mais ne sont pas retrouvées dans les contenus.

Les algues vertes unicellulaires **CHLA, CLOS, OOCY** et **STAU** sont respectivement présentes dans 1, 4, 4 et 13 contenus mais sont absentes de la liste de phytobenthos.

CHRYSOC, CHRYSOP, HYDR, TETR sont retrouvées uniquement sur le terrain. En ce qui concerne les diatomées, la diversité dans le relevé de phytobenthos est nettement supérieure à celle de l'ensemble des contenus. En effet, les groupes de diatomées **AMPH, BRAC, CALO, CYMA, DELI, DENT, EUCO, GYRO, HIPPI, PENN** et **REIM** ne sont identifiés que sur le relevé de phytobenthos, cependant le groupe **MERI** présent avec une occurrence de 27 dans les contenus n'est retrouvé que dans les relevés des algues des contenus.

La Figure 42 montre l'abondance relative de chacun des groupes d'algues évoqués dans le relevé de phytobenthos. Une dominance des groupes d'algues **ACHN, CYA, CYMB, GOMP**, en 2015 et **COCC** en 2017 est observée. La même figure est représentée en Annexe 9 avec les densités cellulaires, elle permet de constater une différence de densité sur ASSE et D0BIS entre 2015 et 2017, les densités étant beaucoup plus élevées en 2017.

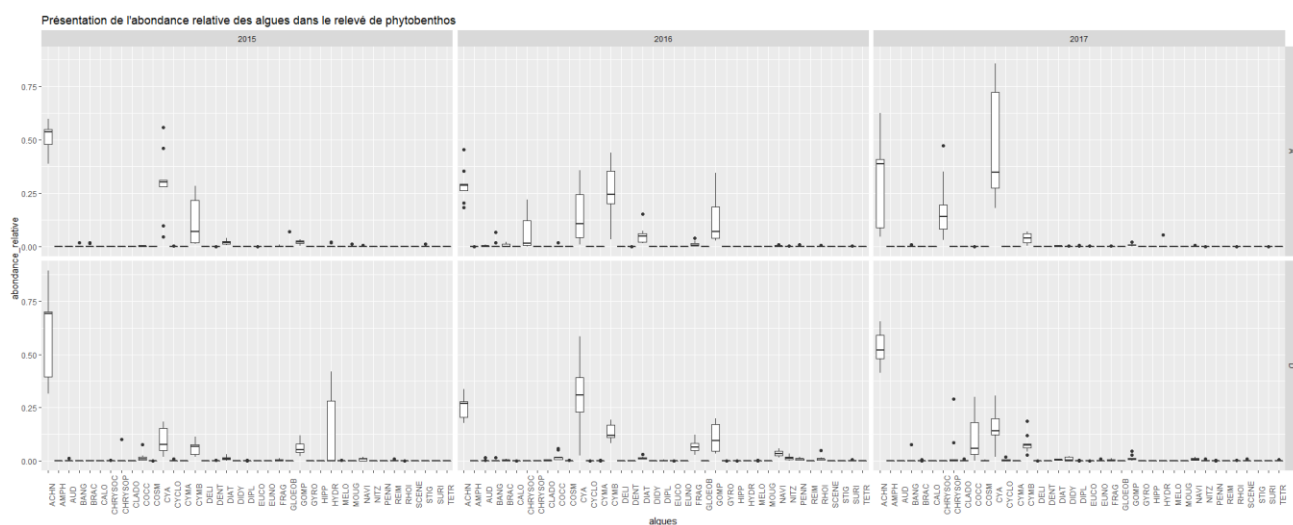


Figure 42 : Abondance relative des algues des relevés de phytobenthos en 2015, 2016 et 2017 sur ASSE et D0BIS dans les trois ambiances de vitesse en densité cellulaire et abondance relative

- *Utilisation de l'indice linéaire de Strauss pour étudier la sélectivité*

Le calcul de l'indice de Strauss, et la comparaison des listes phytobenthos et contenus permet de distinguer 3 catégories, déjà définies dans la partie précédente, les non-consommées, les exclusives et les sélectionnées. Comme précédemment pour faciliter l'analyse seuls les groupes d'algues ayant des indices de Strauss médian compris entre +0,01 et -0,01 sont analysés. Les variations de l'indice de Strauss sont étudiées selon la station, l'année et le taxon.

Afin d'éviter les erreurs d'interprétation les groupes d'algues qui sont présents uniquement sur le relevé de phytobenthos du terrain, dits non-consommés, ne sont pas considérés pour interpréter les variations de l'indice de Strauss selon la station, l'année et le taxon. Le graphique des indices de Strauss avec l'ensemble des algues est visible en Annexe 10 mais il faudra être prudent sur la signification des résultats qui s'affichent pour les raisons qui viennent d'être évoquées.

➤ *Sélectivité des groupes d'algues selon le taxon de macroinvertébrés*



Figure 43 : Calcul de l'indice de Strauss selon le taxon de macroinvertébrés

Ecdyonurus, a une sélectivité plus importante pour **GOMBP** et **ACHN** et plus faible pour **CYMB** et **COCC**.

Ephemerella et **Oligoneuriella**, se différencient principalement de **Ecdyonurus** par une légère sélectivité pour les algues rouges filamenteuses comme **AUD**.

Ephemerella se différencie par une sélectivité plus grande sélectivité pour **FRAG**.

Oligoneuriella, montre des préférences pour **GOMP**, **COCC**, **CYCLO** et **CYMB**.

➤ Sélectivité des groupes d'algues selon la station

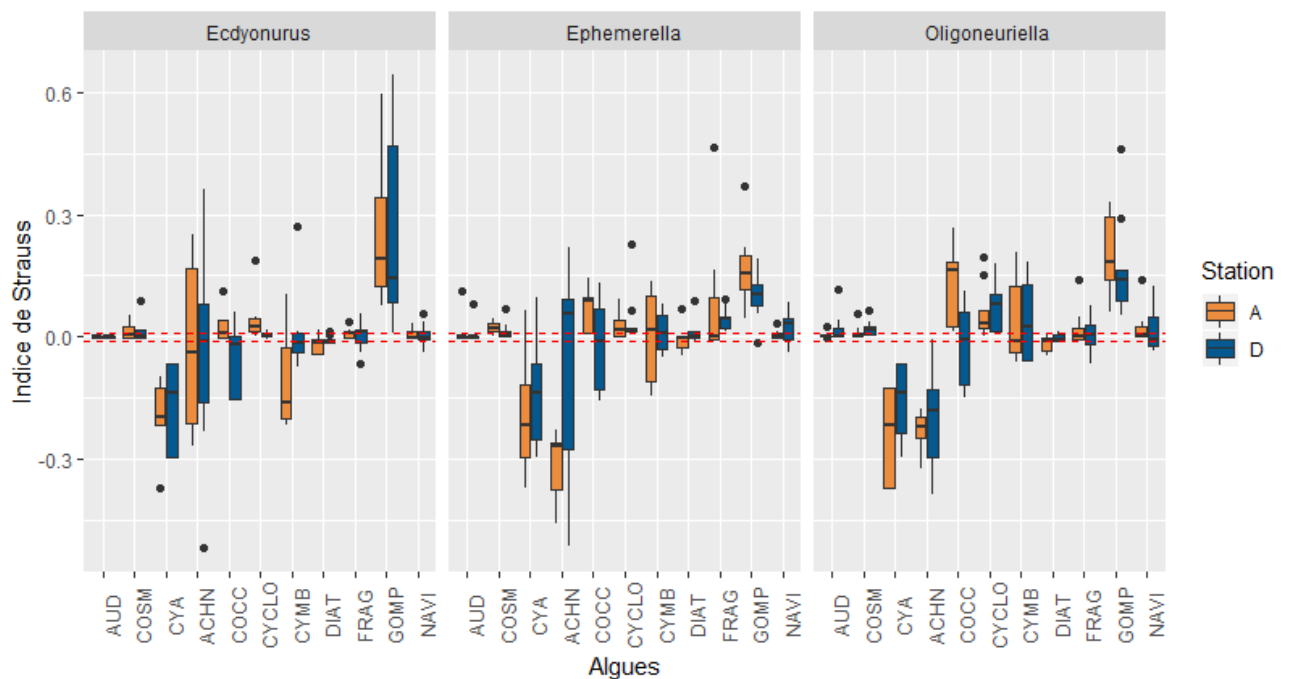


Figure 44 : Calcul de l'indice de Strauss selon la station pour *Ecdyonurus*, *Ephemerella* et *Oligoneuriella*

Ecdyonurus : COCC est sélectionné sur l'Asse et consommé en Durance et inversement pour CYMB.

Ephemerella : COCC est sélectionné préférentiellement sur l'Asse.

Oligoneuriella : Les résultats restent identiques excepté pour COCC, qui serait sélectionné sur l'Asse et AUD sélectionné uniquement en Durance.

➤ Sélectivité des groupes d'algues selon l'année

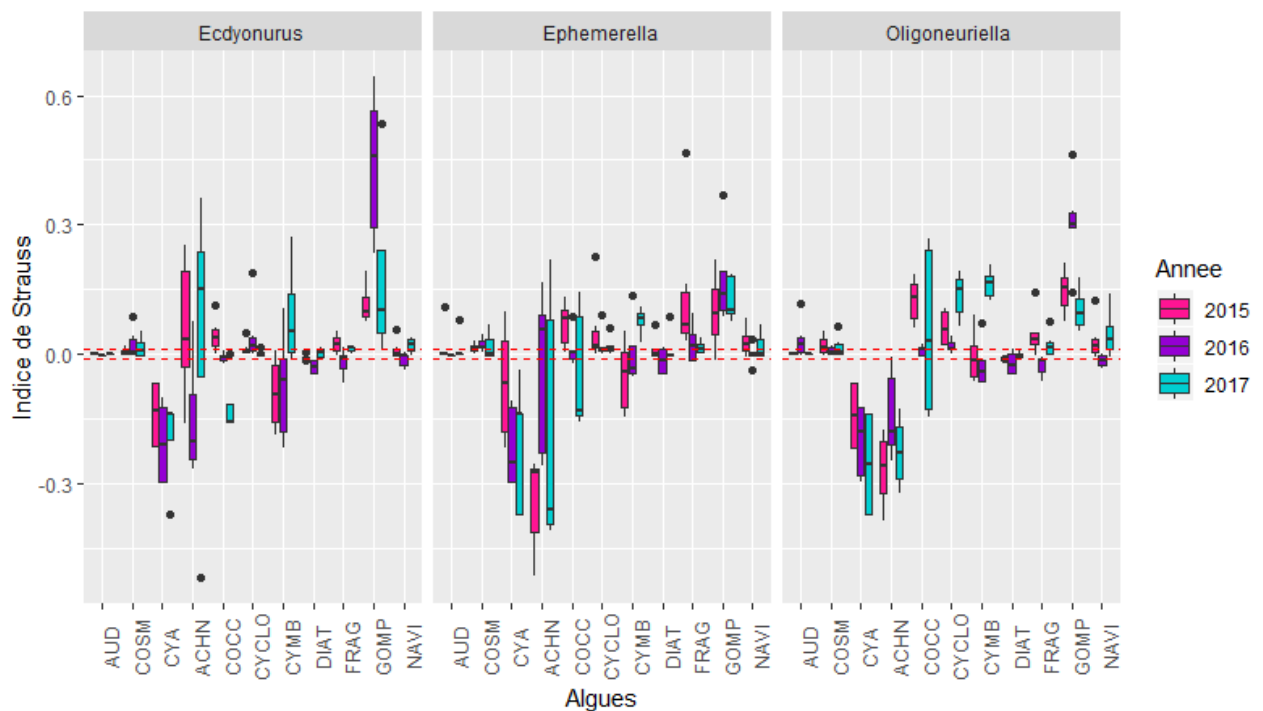


Figure 45 : Calcul de l'indice de Strauss selon l'année pour *Ecdyonurus*, *Ephemerella* et *Oligoneuriella*

Ecdyonurus : Les aspects remarquables sont une sélectivité pour **ACHN** en 2015 et 2017 tandis qu'elle est juste consommée en 2016. En parallèle la sélectivité pour **GOMP** est plus importante en 2016. Par la suite **COCC** est sélectionné en 2015 et **CYMB** en 2017.

Ephemerella : **FRAG** a un indice de Strauss plus élevé en 2015. En 2016 **ACHN** est plus consommé et **GOMP** a l'indice de Strauss le plus élevé. **COCC** est sélectionné uniquement en 2015 et de manière moins évidente en 2016. **CYMB** est sélectionnée surtout en 2017.

Oligoneuriella : **AUD** est sélectionnés en 2016. **FRAG** est sélectionnée en 2015 et 2017 tout comme **NAVI**. Le taux de sélection pour **GOMP** est encore une fois plus élevé pour 2016. **CYCLO** et **COCC** sont plus sélectionnés en 2015 et 2016. En ce qui concerne **CYMB**, une forte sélectivité est observée en 2017.

➤ La sélectivité selon la station et l'année

La RDA et la permanova réalisées pour les contenus de tubes digestifs des trois taxons Figure 41 et Tableau 5 ainsi que les boxplot qui représentent le relevé de phytobenthos Figure 42 et 43 montrent des interactions entre les variables station et année. La Figure 46 illustre ces interactions années et stations pour l'indice de Strauss.

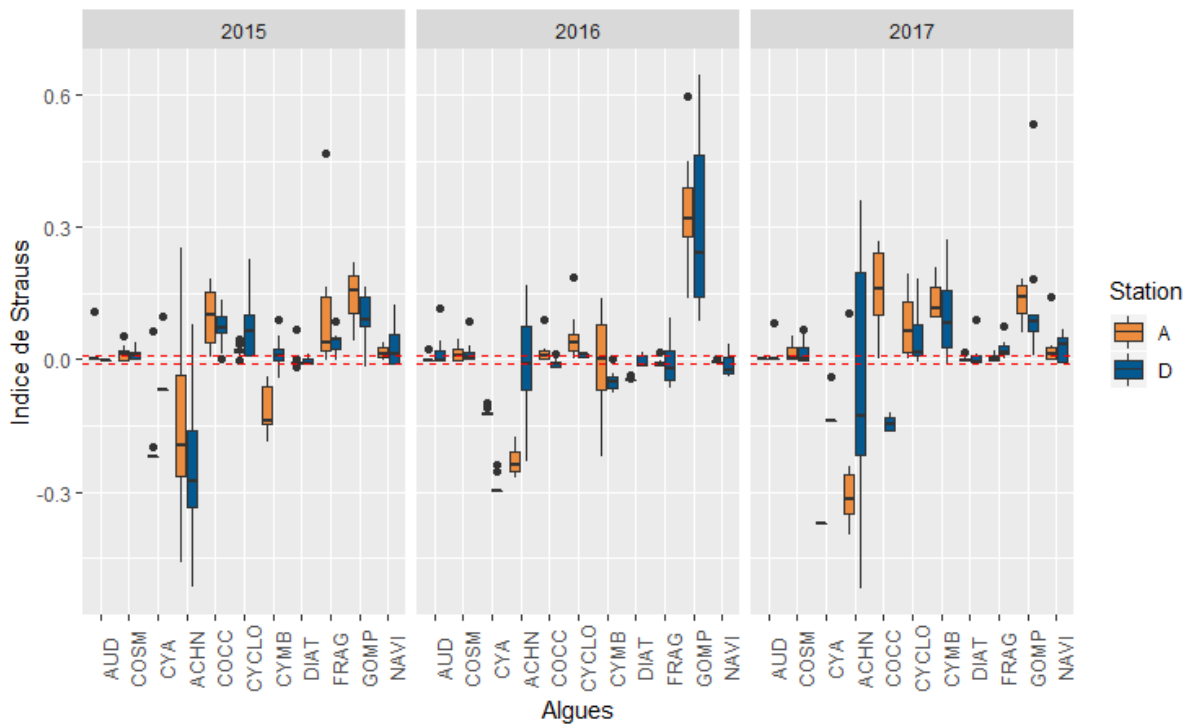


Figure 46 : Indice de Strauss selon l'année et la station

Effectivement des différences dans les deltas ASSE – D0BIS, ASSE – ASSE et D0BIS – D0BIS s'observent selon l'année. Par exemple pour **ACHN** la différence inter-station est plus importante en 2016 qu'en 2017 et 2015, de plus la répartition des valeurs de l'indice de Strauss est plus étendue en D0BIS en 2017.

- *Le cas des algues vertes filamenteuses*

Les algues vertes filamenteuses structurent les contenus de tubes digestifs. Cependant comme expliqué dans la partie méthodologie les principaux genres identifiés qui sont **SPIRO** et **ULOT** sont absents du relevé de terrain. Des algues vertes filamenteuses identifiées sur le terrain ne sont pas présentes dans les contenus. Ce qui rend le calcul de l'indice de Strauss pour ce groupe incohérent. Cependant, l'affichage des abondances d'AVF dans les contenus selon le taxon, la station et l'année Figure 47 montre une préférence des **AVF** chez *Ephemerella* sur la station ASSE avec une consommation croissante de 2015 à 2017.

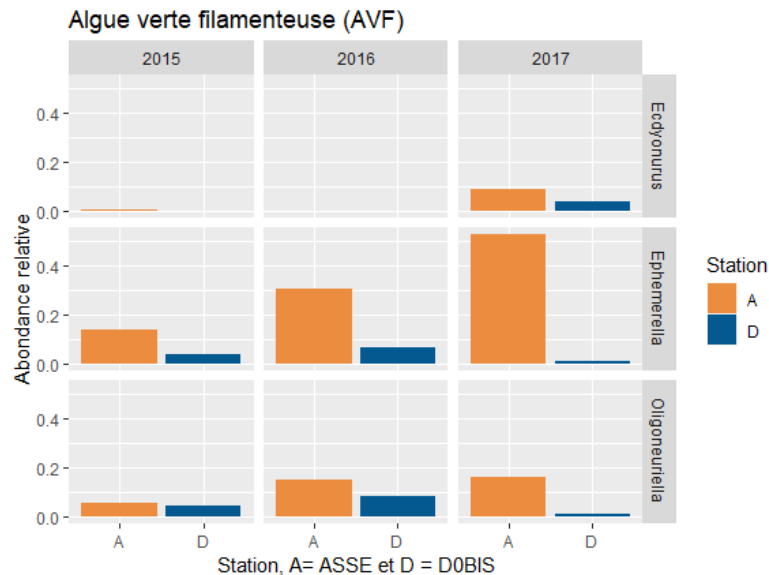


Figure 47 : Abondance relative moyenne du groupe AVF dans les contenus des trois Ephéméroptères

- *La consommation des algues par les macroinvertébrés varie selon la station, l'année et le taxon*

➤ **Gomphonema (GOMP) :**

Ce groupe d'algues est **sélectionné** avec un indice de Strauss médian toujours **supérieur ou égal à 0.1**. Le taux de sélectivité pour ce groupe est plus important chez **Ecdyonurus**, avec une augmentation de la sélectivité en **2016**.

➤ **Achnanthidium – Achnanthes (ACHN) :**

La consommation, pour ce groupe d'algues est beaucoup plus importante pour *Ecdyonurus*. En **2015 et 2017**, ACHN est même **sélectionné** par **Ecdyonurus**.

➤ **Cymbella – Encyonema – Cymbopleura – Amphora (CYMB) :**

Ce groupe est sélectionné chez *Oligoneuriella* et *Ephemerella*. Chez *Ecdyonurus* l'indice de Strauss est supérieur à zéro seulement en Durance et/ou en 2017. **La sélectivité** pour ce groupe d'algues est **très variable**, selon l'année, la station et les taxons de macroinvertébrés considérés.

➤ **Cocconeis (COCC)**

Sélectionné, en particulier par **Ephemerella** et **Oligoneuriella** de préférence sur l'Asse.

➤ Cyclotella (**CYCLO**) :

Oligoneuriella sélectionne ce groupe quel que soit l'année ou la station considérée.

➤ Cyanobactéries (**CYA**) :

Ce groupe est **non consommés** au vu des proportions dans les contenus qui sont très négligeables face à celles trouvées sur le terrain.

➤ Algues rouges filamenteuses (**ARF**) :

ARF concerne en particulier l'algue Audouinella (AUD). Le calcul de l'indice de Strauss selon le taxon, l'année et la station montre une sélectivité pour cette algue par **Oligoneuriella** en particulier en D0BIS et en 2016.

➤ Algues vertes filamenteuses (**AVF**) :

Avec l'absence de ces algues dans les relevés de terrain, le taux de consommation est comparé. Ces groupes sont plus fortement consommés par **Ephemerella**, en particulier sur l'**Asse** et en **2017**.

En conclusion, *Ephemerella* se distingue par sa consommation en Algues vertes filamenteuses (**AVF**), principalement sur l'Asse, et *Ecdyonurus* par sa sélectivité pour *Achnanthes* - *Achnanthes* (**ACHN**). Dans l'ensemble les groupes d'algues *Gomphonema* (**GOMP**) et *Cyclotella* (**CYCLO**) sont sélectionnés par *Oligoneuriella*, *Ecdyonurus* et *Ephemerella*, au mois de mai 2015, 2016 et 2017 sur l'Asse et la Durance. Une préférence est remarquable pour *Gomphonema* (**GOMP**). Cependant l'ensemble des analyses met en évidence la forte interaction entre les variables taxons, années et stations et ainsi montre la nécessité de considérer les trois variables pour l'interprétation des résultats.

V- INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

1) Les améliorations du protocole d'étude des contenus de tubes digestifs

Cette étude nous a permis d'affiner un protocole d'échantillonnage représentatif des contenus de tubes digestifs d'*Oligoneuriella*, *Ephemerella* et *Ecdyonurus*. L'aspect nouveau et expérimental de ce travail permet de discuter différents points de la méthode utilisée.

Le **nombre de macroinvertébrés** choisis par conditions pour l'étude de la dynamique des contenus de tubes digestifs, était fixé à trois par condition (taxon, année, station). Cependant, si l'on tient compte de la variabilité inter-individus existante ainsi que de l'expérience montrant que pour *Oligoneuriella* la richesse des contenus est représentée sur chacune des stations Asse et Durance à partir de sept macroinvertébrés, ce nombre de trois s'avère insuffisant.

Par ailleurs, même en prenant toutes les précautions nécessaires lors de la capture sur le terrain du tri et du stockage au laboratoire à long terme des macroinvertébrés, leur dégradation est inévitable. En effet, lors de la recherche des macroinvertébrés dans les échantillons existants, deux problèmes se sont posés : la dissociation immédiate des contenus après l'ouverture ou l'absence d'un tube digestif dans l'individu. De plus même lorsqu'il est possible d'extraire le tube, dans certains contenus très peu de cellules algales sont comptabilisées. Ce sont des valeurs extrêmes du jeu de données. Si l'étude des contenus de douze *Oligoneuriella* c'est avérée concluante pour observer des différences entre les contenus de l'Asse et de la Durance, la bibliographie préconise d'avoir à disposition 15 à 20 macroinvertébrés par effet étudié (Rosi-Marshall et al., 2016).

La taille des macroinvertébrés disséqués a été fixée entre 5 et 7 mm. Cependant pour des raisons de potentielle variabilité du régime alimentaire selon la taille il est préférable de considérer une diversité plus importante de tailles (Tierno de Figueroa et al., 2019). Sur le plan technique, la faisabilité d'extraction d'un tube digestif est envisageable jusqu'à environ 3 mm au minimum.

La **méthode de conservation des macroinvertébrés** est importante pour faciliter l'extraction des tubes digestifs. Dans cette expérience DREAM, les macroinvertébrés ont été fixés au formol à 5% sur le terrain, puis conservés au laboratoire plusieurs années dans l'éthanol à 70 %. Même si certains macroinvertébrés étaient abîmés, cette conservation semble correcte pour la réalisation de l'extraction de tube digestifs. Une étude sur les méthodes d'extraction et d'évaluation des contenus de tubes digestifs des macroinvertébrés préconise l'utilisation de la solution de Kahle comme fixateur. Cette solution composée d'éthanol, de formaldéhyde et d'acide acétique dilué dans de l'eau distillée permet de garder des insectes « souples et flexibles », et de faciliter l'extraction des contenus. La méthode de conservation préconisée insiste surtout sur la nécessité de ne pas fixer les macroinvertébrés avec l'éthanol. Cette pratique assèche les individus, rendant leur dissection plus compliquée (Rosi-Marshall et al., 2016).

La **dissection** de Oligoneuriella, Ecdyonurus et Ephemerellae est à adapter selon la morphologie de l'Ephéméroptère et la compétence de la personne réalisant la dissection. L'extraction des contenus de tubes digestifs d'une douzaine d'individus peut être faite en une journée.

La **détermination des algues des contenus** au microscope est variable selon les échantillons. Une fois les méthodes de détermination des algues dans les contenus assimilées et la pratique acquise, le temps pour analyser un contenu en laboratoire est estimée à 60 minutes.

La **méthode d'échantillonnage** des algues dans les contenus peut être améliorée. La complexité de détermination des algues des contenus de tubes digestifs nécessite un travail de spécialiste.

Sur les contenus analysés les principaux problèmes étaient : la surabondance de fragments de diatomées et la forte variabilité du nombre d'entités présentes dans les contenus. Il serait intéressant de tester l'analyse d'une demi-cuve par contenu en comptabilisant les algues vertes filamenteuses, les unicellulaires, les algues rouges filamenteuses et les cyanobactéries en les identifiant au genre si possible, et en comptabilisant uniquement les diatomées identifiables. Il faudrait vérifier sur plusieurs contenus de tubes digestifs si la réalisation d'une demi cuve est réalisable et s'avère représentative de l'ensemble du contenu. De plus le passage en biovolume permettra une autre visualisation des résultats obtenus.

L'**utilisation de l'indice de Strauss** pour évaluer la sélectivité est discutable par son adaptabilité au jeu de données (Confer and Moore, 1987; Kohler and Ney, 1982). De plus les indices de sélectivité ne prennent pas en compte les diatomées mortes du phytobenthos ce qui peut fausser les résultats obtenus (Maasri et al., 2010). Il serait préférable de réaliser les analyses de phytobenthos en distinguant les algues mortes et vivantes.

2) Des dissimilarités dans les contenus qui peuvent s'expliquer par le mode de vie des trois Ephéméroptères et l'hydrologie

Ecdyonurus se distingue par une proportion importante de Gomphonema (**GOMP**) et Achnanthes – Achnantheidium (**ACHN**) dans son tube digestif. Ecdyonurus est le seul taxon d'Ephémère parmi les trois étudiés à être sélectif d'après l'indice de Strauss pour **ACHN**.

Ephemerella, se distingue des deux autres taxons par une consommation plus importante d'Algues vertes filamenteuses (**AFV**). Parmi les **AVF** identifiées se trouve Spirogyra (**SPIRO**) et Ulothrix (**ULOT**).

- Une variabilité inter-taxon dans les contenus des tubes digestifs qui s'explique par des différents traits biologiques (Tachet et al., 2015)

Cette différence entre **Ephemerella** et **Ecdyonurus** pourrait s'expliquer par les préférences en termes d'habitat des deux Ephémères. *Ephemerella*, peut se trouver dans un habitat de type macrophytes et algues filamenteuses. Ce n'est pas le cas pour *Ecdyonurus* qui est plutôt dans des dalles, blocs, pierres et galets, Tableau 2 (elle est dite pétricole). Ainsi, il est difficile de savoir, si les Algues vertes filamenteuses (**AVF**), sont volontairement consommées, ou si elles ont été consommées en même temps que des diatomées vivant sur les algues filamenteuses. Par la suite *Ecdyonurus* aurait tendance à se déplacer en surface du substrat (Le Guellec, 2002). *Achnanthes* – *Achnanthidium* (**ACHN**) et *Gomphonema* (**GOMP**) étant résistantes au courant cela pourrait expliquer leur présence dans les contenus d'*Ecdyonurus*.

- Des dissimilitudes et similitudes inter-année et inter-station qui s'expliquent par l'hydrologie

Des contenus de tubes digestifs structurés par *Achnanthes* – *Achnanthidium* (**ACHN**), *Gomphonema* (**GOMP**), *Cymbella* – *Encyonema* – *Cymbopleura* – *Amphora* (**CYMB**) et les Algues vertes filamenteuses qui, selon le macroinvertébré représenté, s'expliquent par les différences hydrologiques liées à la station et à l'année.

L'année **2016** se **distingue** des années **2015** et **2017** dans la composition des contenus de tubes digestifs. D'un point de vue hydrologique les années 2015 et 2017 se ressemblent dans la mesure où elles sont toutes les deux précédées par une crue automnale importante, contrairement à 2016. En effet les abondances relatives sont les plus faibles en 2016 pour *Achnanthes* – *Achnanthidium* (**ACHN**) et sont plus importantes pour *Cymbella* – *Encyonema* – *Cymbopleura* – *Amphora* (**CYMB**) et *Gomphonema* **GOMP**. L'année 2016 n'étant pas soumise à une forte crue, des algues moins résistantes au courant que **ACHN** peuvent se développer, ce qui tendrait à réduire l'emprise de **ACHN** dans le phytobenthos.

Les Algues vertes filamenteuses (**AVF**) se trouvent dans des proportions plus grandes dans les contenus de tubes digestifs de l'Asse. Les algues vertes filamenteuses qui ont pu être identifiées sont majoritairement *Spirogyra* (**SPIRO**) et *Ulothrix* (**ULOT**). Ces algues ne se trouvent pas dans les relevés de terrain, mais *Spirogyra* est retrouvée dans une analyse faite par la DREAL en Durance en 2015 et 2017, au niveau des Mées et sur l'Asse vers Oraison en 2015 ("L'hydrobiologie en PACA et Occitanie," 2018). Ce qui peut signifier que la présence de cette algue dans les contenus, et pas dans le relevé de terrain, est la cause d'une dérive de ces algues ou des macroinvertébrés ou que ces groupes d'algues ne se développent pas dans les zones échantillonnées lors de cette étude.

Cependant si le choix a été fait dans un premier temps de s'intéresser seulement à l'hydrologie, les composantes physico-chimiques du cours d'eau comme la température et la pollution organique ne sont pas négligeables pour les interprétations qui pourront être faite dans ce type d'étude (Cazaubon and Giudicelli, 1999).

3) Comparaison avec les algues des contenus d'Heptageniidae et Chironomidae (Le Guellec, 2002; Maasri et al., 2010)

En 2010 la thèse de Monsieur Alain Maasri a contribué à éclaircir les interactions entre chironomes et phytobenthos sur l'Arc provençal, un cours d'eau méditerranéen soumis à des taux importants de nutriments favorisant le développement de chironomes (larves d'insecte Diptères Chironomidae). Comme dans les résultats de notre étude, des algues sont trouvées dans les contenus mais absentes du relevé de terrain. C'est le cas par exemple pour *Ulothrix* (**ULOT**) qui, comme dans nos résultats, se trouve dans les contenus mais pas dans le phytobenthos.

Tout comme dans la majeure partie des contenus de tubes digestifs que nous avons analysés, ceux des chironomes présentent une abondance relative dominante des diatomées. En deuxième position domine *Audouinella* (**AUD**). Cette tendance n'a cependant pas été observée dans les contenus d'Ephéméroptères étudiés. De plus la sélectivité pour les Cyanophycées des chironomes n'est pas retrouvée dans *Oligoneuriella*, *Ephemerella* et *Ecdyonurus*.

Ephemerella présente une préférence pour les algues vertes filamenteuses sur l'Asse. De même Maasri (2010) montre que les chironomes sélectionnent les chlorophycées et plus précisément l'algue verte filamenteuse *Stigeoclonium*. La sélection de cette algue s'expliquerait par sa position sur le substrat facilitant la consommation des jeunes cellules. Tout comme le chironome *Eukiefferiella claripennis*, *Ephemerella* préférerait les jeunes cellules qui seraient plus facile à consommer. L'ASSE n'étant pas soumise à un débit réservé, sa dynamique freinerait le développement des algues vertes filamenteuses, favorisant la présence de cellules jeunes et consommables d'algues comme *Spirogyra* (**SPIRO**) et *Ulothrix* (**ULOT**).

La dominante de *Achnanthes* – *Achnanthidium* (**ACHN**) dans les contenus est confirmée par l'étude des contenus en diatomées des Heptageniidae faite par Gwenolle Leguellec. La différence inter-taxon d'Ephéméroptères que nous avons observée quant à la variation des proportions de cette algue dans les contenus est aussi observée pour *Achnantes minutissimum* chez *Rhithrogena* et *Epeorus*.

4) Comparaison avec les études historiques de phytobenthos en Durance (Bi Eau, 2012)

EDF fait réaliser des études sur l'impact des débits réservés par un bureau d'étude. Les stations D0BIS et l'Asse sont étudiées en 2011. Les résultats de ce rapport montrent la présence de *Spirogyra* en Durance (D0BIS) et sur l'Asse en 2011 avec des biomasses largement supérieures aux autres algues échantillonnées. Cependant elle n'est trouvée que dans des faciès lentiques, ce qui confirme le fait qu'elle soit absente du relevé de phytobenthos de l'étude DREAM qui se concentre sur les radiers et faciès lotiques. De plus, comme dans notre étude, *Achnanthes* - *Achnanthidium* et *Gomphonema* sont très abondants.

VI- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Des tendances de préférence alimentaire se dégagent de cette étude exploratoire.

Les contenus de tubes digestifs sur l'**Asse** se caractérisent par *Cymbella* – *Encyonema* – *Cymbopleura* – *Amphora* (particulièrement en 2016 avec les contenus de *Oligoneuriella*) et les Algues vertes filamenteuses, tandis que les contenus de la **Durance** se distinguent par *Achnanthes* – *Achnanthidium*. L'abondance de *Gomphonema* est proche dans les contenus des deux stations. De plus, une consommation plus importante d'Algues vertes filamenteuses, dont *Spirogyra* et *Ulothrix*, se dégage pour *Ephemerella* et une sélectivité très forte pour *Achnanthes* – *Achnanthidium* et *Gomphonema* chez *Ecdyonurus*. *Gomphonema* est sélectionnée, par *Ephemerella*, *Ecdyonurus* et *Oligoneuriella*. Ces dissimilitudes peuvent s'expliquer par la dynamique des algues dans le milieu en lien avec l'hydrologie et les comportements des macroinvertébrés étudiés.

Ces tendances permettent de voir que des caractéristiques du phytobenthos dans des milieux soumis à des conditions hydrologiques différentes peuvent se retrouver dans la composition des contenus de tubes digestifs des macroinvertébrés. Cependant il est difficile d'affirmer dans cette étude que *Achnanthes* – *Achnanthidium*, *Cymbella* – *Encyonema* – *Cymbopleura* – *Amphora* et *Gomphonema* soient préférentiellement sélectionnées. Par la suite il serait intéressant d'ajouter à ce type de travail une phase d'expérimentation en mésocosme qui permettrait de confirmer la sélectivité des macroinvertébrés pour certaines algues.

L'étude des interactions trophiques entre algues et macroinvertébrés a des applications en gestion des cours d'eau, notamment comme dans cette étude, lors de l'analyse de l'impact des aménagements hydroélectriques sur les communautés biologiques aquatiques.

En effet le développement important d'algues vertes filamenteuses comme *Cladophora*, peut perturber la fonctionnalité des substrats en les colmatant et les rendant moins accessibles et aller jusqu'à poser des problématiques d'eutrophisation. Cependant l'impact de *Cladophora* dans les écosystèmes est à étudier car il est aussi envisageable que cette algue filamenteuse soit propice au développement d'espèces d'algues et insectes aquatiques ce qui favoriserait de manière positive la biodiversité du cours d'eau (Zulkifly et al., 2013).

La bibliographie montre que *Cladophora* tend à se développer de manière plus importante en débit réservé, au contraire *Ulothrix* se développe moins bien lorsqu'elle est soumise à ce type de régime (Fayolle et al., 1999b). L'étude réalisée ici montre que parmi les algues vertes filamenteuses identifiées dans les contenus, *Spirogyra* et *Ulothrix* dominent. *Cladophora* n'a pas été identifiée dans l'ensemble des contenus étudiés. La poursuite de l'étude des interactions trophiques phytobenthos et macroinvertébrés, permettrait de vérifier si cette algue est consommée. Cela enrichirait les connaissances écologiques sur l'intérêt de cette algue pour les macroinvertébrés et permettrait de prendre des décisions de gestion adaptées au milieu étudié.

D'autre part, l'étude du lien trophique phytobenthos et macroinvertébrés permet de reconstituer les réseaux trophiques, du producteur primaire au consommateur secondaire. Ces informations sur les réseaux trophiques serviraient à comprendre, au-delà des macroinvertébrés objets de cette étude, la dynamique des différentes communautés biologiques d'un cours d'eau et ainsi mettre en place des mesures de gestion durable. Par exemple, sur La Durance, l'Apron du Rhône est un poisson soumis à un plan national d'actions. Cette espèce est menacée en partie à cause de l'anthropisation des cours d'eau ("Apron, espèce menacée d'extinction. Préservons nos rivières pour sauver l'apron.," 2019). Son régime alimentaire a été étudié et il en est ressorti une sélectivité pour les proies *Baetis fuscatus* et *Ecdyonurus* (Archambaud-Suard et al., 2019; Corse et al., 2017). La compréhension des interactions trophiques entre ce macroinvertébré et l'Apron permettrait une meilleure compréhension du mode de vie de cette espèce et ainsi la mise en place de mesures de gestion plus efficaces pour sa sauvegarde.

BIBLIOGRAPHIE

Allan, J.D., 1995. Stream Ecology: Structure and function of running waters. Springer Netherlands, Dordrecht.

Apron, espèce menacée d'extinction. Préservons nos rivières pour sauver l'apron. [WWW Document], 2019. . Apron Espèce Menacée Extinction Préservons Nos Rivières Pour Sauv. Apron. URL <http://www.aprondurhone.fr/> (consulté le 27/09/2019)

Archambaud-Suard, G., Voisin, L., Marchandise, A., 2018. Dynamique de recolonisation des Algues et des Macroinvertébrés suite aux lâchers d'eau pour le décolmatage des substrats. Compte-rendu technique de l'année 2017.

Archambaud-Suard, G., Corse, E., Meglécz, E., Chappaz, R., Dubut, V., 2019. Une étude inédite de métabarcoding pour étudier le régime alimentaire de l'apron. Sci. Eaux Territ. IV12-19.

Archambaud-Suard, G., Logez, M., Laitao, M., Voisin, L., Marchandise, A., 2018. Dynamique de recolonisation des Algues et des Macroinvertébrés suite aux lâchers d'eau pour le décolmatage des substrats. Synthèse des résultats des invertébrés et de périphyton des années 2014, 2015, 2016. IRSTEA - EDF - Bi-Eau, Centre d'Aix en Provence 3275 route de Cézanne - CS 40061 13182 Aix en Provence.

Bi Eau, 2012. Etude Durance - Campagne 2011, "Renouvellement de la concession de Sainte Tulle : étude expérimentale des débits réservés en Moyenne Durance" CONFIDENTIEL.

Bourrelly, P., Heim, R., 1990. Les algues d'eau douce: initiation à la systématique. Tome 1, Tome 1,.

Carey, Cayelan C., Bas W. Ibelings, Emily P. Hoffmann, David P. Hamilton, et Justin D. Brookes. 2012. « Eco-Physiological Adaptations That Favour Freshwater Cyanobacteria in a Changing Climate ». Water Research 46 (5): 1394-1407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.016>.

Cazaubon, A., Giudicelli, J., 1999. Impact of the residual flow on the physical characteristics and benthic community (algae, invertebrates) of a regulated Mediterranean river: the Durance, France. Regul. Rivers Res. Manag. 15, 441–461. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199909/10\)15:5<441::AID-RRR558>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199909/10)15:5<441::AID-RRR558>3.0.CO;2-9)

Code de l'environnement - Article L214-18, n.d. , Code de l'environnement.

Confer, J.L., Moore, M.V., 1987. Interpreting Selectivity Indices Calculated from Field Data or Conditions of Prey Replacement. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 44, 1529–1533. <https://doi.org/10.1139/f87-184>

Corse, E., 2018. Rapport d'activité Projet DREAM (Version temporaire).

Corse, E., Archambaud Suard, G., Meglécz, E., Balmain, J.-P., Bertrand, M., Chappaz, R., Dubut, V., 2017. Etude du comportement alimentaire de l'Apron du Rhône (Zingel asper L.). Secteurs Ardèche, Loue, Durance, Buëch 2014-2015 et Verdon 2015. (Rapport de fin de travaux Aix-Marseille Université / Irstea).

Coste, M., Rosebery, J., DREAL/DRIEE, van de Vijver, B., 2011. Guide iconographique pour la mise en oeuvre de l'Indice Biologique Diatomée 2007.

Fayolle, S., Cazaubon, A., Comte, K., 1999. Réponses et stratégies d'adaptation des communautés algales épilithiques à différents régimes hydrologiques. Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. III - Sci. Vie 322, 413–422. [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(99\)80077-8](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(99)80077-8)

- Fuller, R.L., Roelofs, J.L., Fry, T.J., 1986. The Importance of Algae to Stream Invertebrates. *J. North Am. Benthol. Soc.* 5, 290–296. <https://doi.org/10.2307/1467481>
- Géoportail [WWW Document], n.d. URL <https://www.geoportail.gouv.fr/> (consulté le 27/09/2019).
- Hillebrand, H., 2009. Meta-analysis of grazer control of periphyton biomass across aquatic ecosystem: Grazer control of periphyton biomass. *J. Phycol.* 45, 798–806. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2009.00702.x>
- Kindt, R., Richard, C., 2005. Tree diversity analysis. A manual and software for common statistical methods for ecological and biodiversity studies. World Agroforestry Center, Nairobi: World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Kohler, C.C., Ney, J.J., 1982. A comparison of methods for quantitative analysis of feeding selection of fishes. *Environ. Biol. Fishes* 7, 363–368. <https://doi.org/10.1007/BF00005571>
- Le Guellec, G., 2002. Comparaison des assemblages diatomiques dans les tubes digestifs des Ephéméroptères Heptageniidae, avec ceux prélevés sur le substrat de manière standardisée (Norme IBD) (MASTER 2). CEMAGREF, Aix en Provence, Le Tholonet.
- Lê, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: Package for Multivariate Analysis. *J. Stat. Softw.* 25. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lebart, L., Morineau, A., Piron, M., 1995. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Dunod, Paris.
- Legendre, P., Gallagher, E.D., 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* 129, 271–280. <https://doi.org/10.1007/s004420100716>
- L'hydrobiologie en PACA et Occitanie [WWW Document], 2018. URL <http://hydrobiologie-paca.fr/> (consulté le 27/09/2019).
- Maasri, A., Fayolle, S., Franquet, E., 2010. Algal foraging by a rheophilic chironomid (*Eukiefferiella claripennis* Lundbeck) extensively encountered in high nutrient enriched streams. *Fundam. Appl. Limnol. Arch. Für Hydrobiol.* 177, 151–159. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2010/0177-0151>
- Oksanen, J., Blanchet, G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., R.Minchin, P., B.O'Hara, L.; Simpson, Solymos, Stevens, Szoecs, Wagner, 2019. *vegan: Community Ecology Package*.
- Pan, Y., Lowe, R.L., 1994. Independent and interactive effects of nutrients and grazers on benthic algal community structure. *Hydrobiologia* 291, 201–209. <https://doi.org/10.1007/BF00014709>
- Poff, L.N., Wellnitz, T., Monroe, J.B., 2003. Redundancy among three herbivorous insects across an experimental current velocity gradient. *Oecologia* 134, 262–269. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1086-2>
- Rosi-Marshall, E.J., Wellard Kelly, H.A., Hall, R.O., Vallis, K.A., 2016. Methods for quantifying aquatic macroinvertebrate diets. *Freshw. Sci.* 35, 229–236. <https://doi.org/10.1086/684648>
- Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., Usseglio-Polatera, P., 2015. *Invertébrés d'eau douce systématique, biologie, écologie*. CNRS éditions, Paris.
- Tierno de Figueroa, J.M., López-Rodríguez, M.J., Villar-Argaiz, M., 2019. Spatial and seasonal variability in the trophic role of aquatic insects: An assessment of functional feeding group applicability. *Freshw. Biol.* <https://doi.org/10.1111/fwb.13277>
- Wellnitz, T.A., Ward, J.V., 1998. Does light intensity modify the effect mayfly grazers have on periphyton? *Freshw. Biol.* 39, 135–149. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1998.00270.x>

Zulkifly, S.B., Graham, J.M., Young, E.B., Mayer, R.J., Piotrowski, M.J., Smith, I., Graham, L.E., 2013. The Genus *Cladophora* Kützing (Ulvophyceae) as a Globally Distributed Ecological Engineer. *J. Phycol.* 49, 1–17. <https://doi.org/10.1111/jpy.12025>

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation des abréviations des groupes d'algues

Abbréviation	Correspondance
Algue rouge filamenteuse	
AUD	Audouinella
BANG	Bangia atropurpurea
Algue verte filamenteuse	
AVF	Algue verte filamenteuse
AVFR	Algue verte filamenteuse ramifiée
CHAET	Chaetophora
OEDO	Oedocladium
OEDOG	Oedogonium
SPIRO	Spirogyra
ULOT	Ulothrix
CLADO	Cladophora
MOUG	Mougeotia
STIG	Stigeoclonium
Algue verte unicellulaire	
AVS	Algue verte siphonnée
AVU	Algue verte unicellulaire
CHLA	Chlamydomonas
CLOS	Closterium
COSM	Cosmarium
OOCY	Oocystis
SCENE	Scenedesmus
STAU	Staurostrum
CHRYSOC	Chrysocapsa
CHRYSOP	Chrysophycées indéterminées
HYDR	Hydrurus
TETR	Tetrastrum
Algue indéterminée	
AF	Algue filamenteuse
AI	Algue indéterminée
Cyanobactérie	
CYA	Cyanobactéries
Diatomée	
ACHN	Achnantidium – Achnantes
AMPH	Amphipleura
BRAC	Brachysira
CALO	Caloneis
COCC	Cocconeis
CYCLO	Cyclotella
CYMA	Cymatopleura
CYMB	Cymbella – Encyonema – Cymbopleura – Amphora
DELI	Delicata
DENT	Denticula
DIAT	Diatoma
DIDY	Didymosphenia
DIPL	Diploneis
EUCO	Eucocconeis
EUNO	Eunotia
EPIT	Epithemia
FD	Fragment Diatomée
FRAG	Fragilaria – Ulnaria
GOMP	Gomphonema
GYRO	Gyrosigma
HIPP	Hippodonta
MELO	Melosira
MERI	Meridion
NAVI	Navicula – Sellaphora
NITZ	Nitzschia
PENN	pennées (vues connectives)
REIM	Reimeria
RHOI	Rhoicosphenia
SURI	Surirella
	Présente exclusivement sur le terrain
	Présente exclusivement dans les contenus

Annexe 2 : Article de loi sur les débit réservés :

Article L214-18 En savoir plus sur cet article...

Créé par [Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 - art. 6 JORF 31 décembre 2006](#)

« I.-Tout ouvrage à construire dans le lit d'un cours d'eau doit comporter des dispositifs maintenant dans ce lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux au moment de l'installation de l'ouvrage ainsi que, le cas échéant, des dispositifs empêchant la pénétration du poisson dans les canaux d'amenée et de fuite.

Ce débit minimal ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage correspondant au débit moyen interannuel, évalué à partir des informations disponibles portant sur une période minimale de cinq années, ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur. Pour les cours d'eau ou parties de cours d'eau dont le module est supérieur à 80 mètres cubes par seconde, ou pour les ouvrages qui contribuent, par leur capacité de modulation, à la production d'électricité en période de pointe de consommation et dont la liste est fixée par décret en Conseil d'Etat pris après avis du Conseil supérieur de l'énergie, ce débit minimal ne doit pas être inférieur au vingtième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage évalué dans les mêmes conditions ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur. Toutefois, pour les cours d'eau ou sections de cours d'eau présentant un fonctionnement atypique rendant non pertinente la fixation d'un débit minimal dans les conditions prévues ci-dessus, le débit minimal peut être fixé à une valeur inférieure.

II.-Les actes d'autorisation ou de concession peuvent fixer des valeurs de débit minimal différentes selon les périodes de l'année, sous réserve que la moyenne annuelle de ces valeurs ne soit pas inférieure aux débits minimaux fixés en application du I. En outre, le débit le plus bas doit rester supérieur à la moitié des débits minimaux précités.

Lorsqu'un cours d'eau ou une section de cours d'eau est soumis à un étiage naturel exceptionnel, l'autorité administrative peut fixer, pour cette période d'étiage, des débits minimaux temporaires inférieurs aux débits minimaux prévus au I.

III.-L'exploitant de l'ouvrage est tenu d'assurer le fonctionnement et l'entretien des dispositifs garantissant dans le lit du cours d'eau les débits minimaux définis aux alinéas précédents.

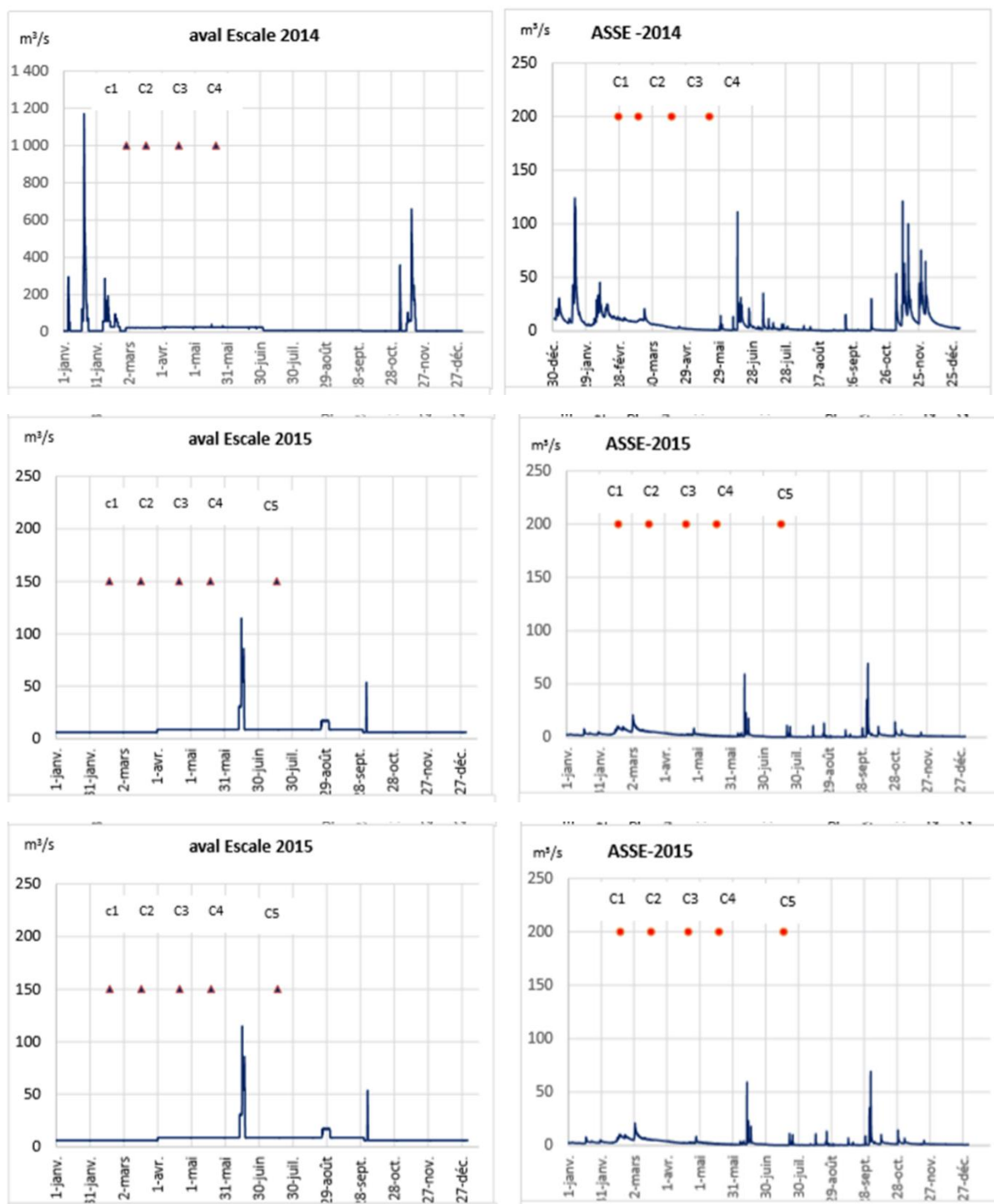
IV.-Pour les ouvrages existant à la date de promulgation de la [loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006](#) sur l'eau et les milieux aquatiques, les obligations qu'elle institue sont substituées, dès le renouvellement de leur concession ou autorisation et au plus tard le 1er janvier 2014, aux obligations qui leur étaient précédemment faites. Cette substitution ne donne lieu à indemnité que dans les conditions prévues au III de l'article [L. 214-17](#).

V.-Le présent article n'est applicable ni au Rhin ni aux parties internationales des cours d'eau partagés. »

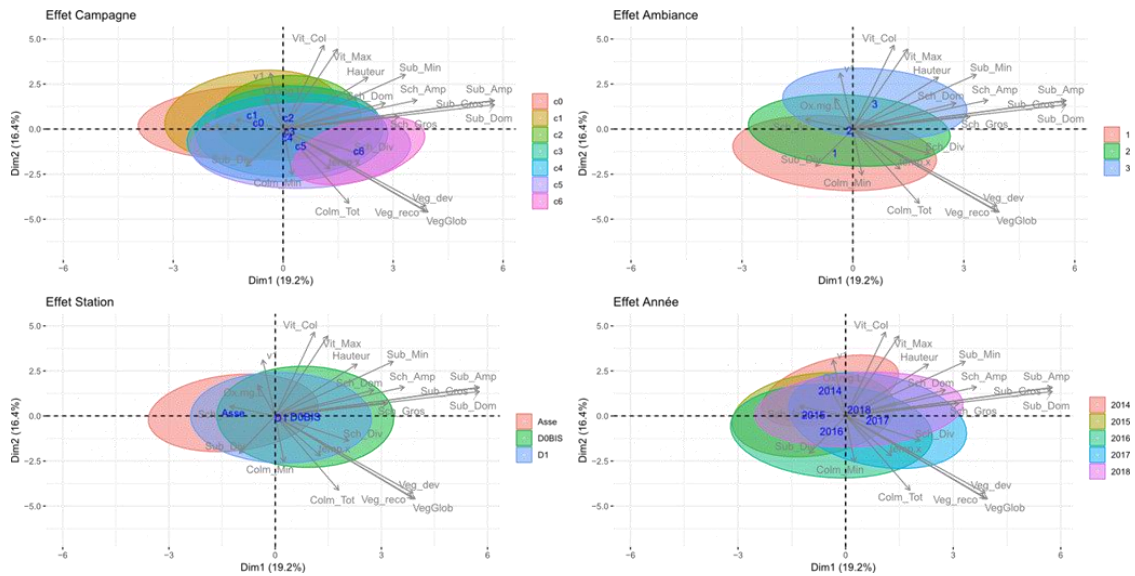
Annexe 3 : Évolution des débits horaires moyen sur l'Asse et la Durance

« Evolution des débits horaires moyens (m³/s) sur la Durance, à l'aval du barrage de l'Escale, (6 km en amont de la station D0BIS). Les triangles rouges correspondent aux dates des campagnes de l'étude Dream. Evolution débits horaires moyens (m³/s) sur l'Asse, à la station limnimétrique de la Clue Chabrières (15 km amont de la station ASSE). Les points rouges correspondent aux dates des campagnes de l'étude Dream, pour 2014 en Durance seulement. »

Source : Archambaud – Suard et al, 2018.



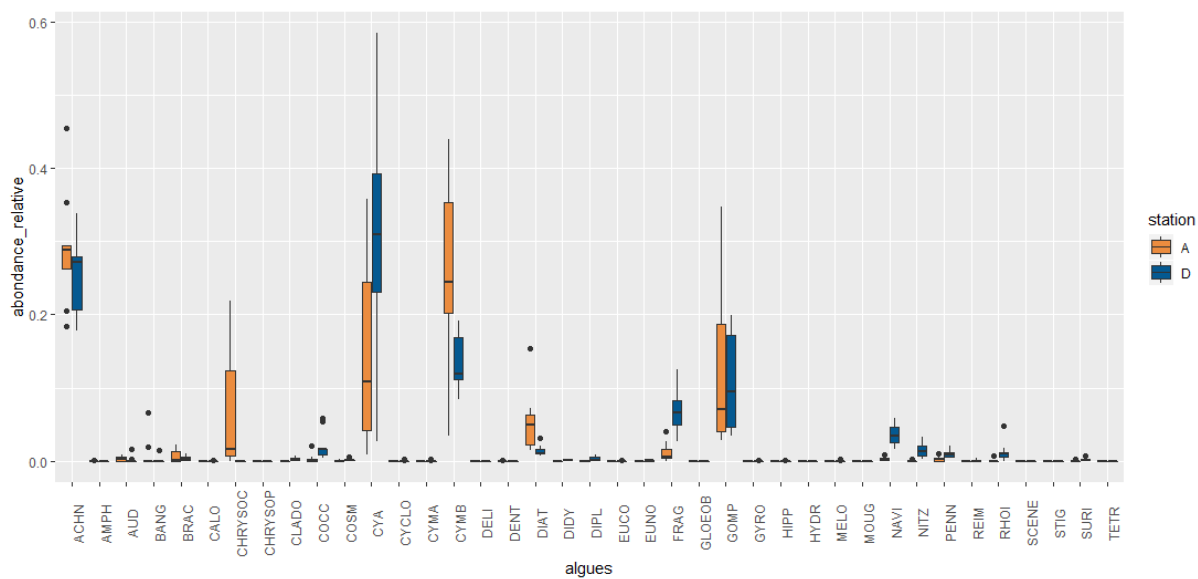
Annexe 4 : ACP illustrant les variables déterminant les habitats retrouvés dans l'étude DREAM (Corse, 2018)



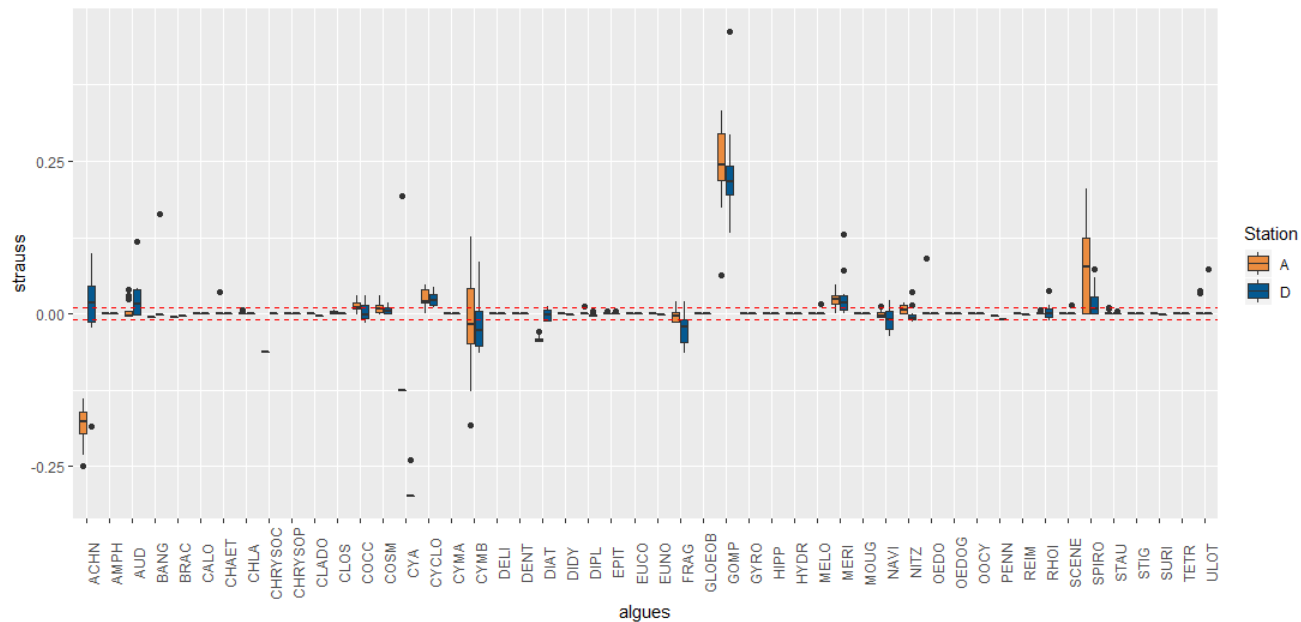
Annexe 5 : Présentation des abondances et des occurrences des contenus 24 contenus d'Oligoneuriella de Mai 2016 sur l'Asse et la Durance

	Contenus Oligoneuriella Mai 2016			
	Abondance ASSE	Abondance D0BIS	Occurrence ASSE	Occurrence D0BIS
Algue Rouge Filamenteuse				
AUD	17	73	3	7
BANG	0	50	0	1
Algue Verte Filamenteuse				
AVF	79	100	10	10
AVFR	0	5	0	1
CHAET	8	0	1	0
OEDO	7	0	1	0
SPIRO	157	47	7	6
ULOT	17	22	2	1
Algue verte unicellulaire				
AVU	16	7	4	3
CHLA	1	0	1	0
CLOS	4	0	4	0
COSM	20	17	9	9
SCENE	0	4	0	1
STAU	3	1	2	1
Algue indéterminée				
AF	0	4	0	1
AI	0	5	0	2
Cyanobactérie				
CYA	73	18	1	1
Diatomée				
ACHN	197	601	12	12
COCC	28	57	10	12
CYCLO	57	56	11	12
CYMB	633	273	12	12
DIAT	8	30	5	9
DIPL	1	4	1	3
EPIT	1	1	1	1
FD	3538	3265	12	12
FRAG	27	103	8	12
GOMP	783	827	12	12
MELO	0	5	0	1
MERI	53	61	11	9
NAVI	9	64	6	11
NITZ	17	34	7	10
RHOI	3	33	3	10

Annexe 6 : Abondance relative du phytobenthos sur l'Asse et la Durance en Mai 2016



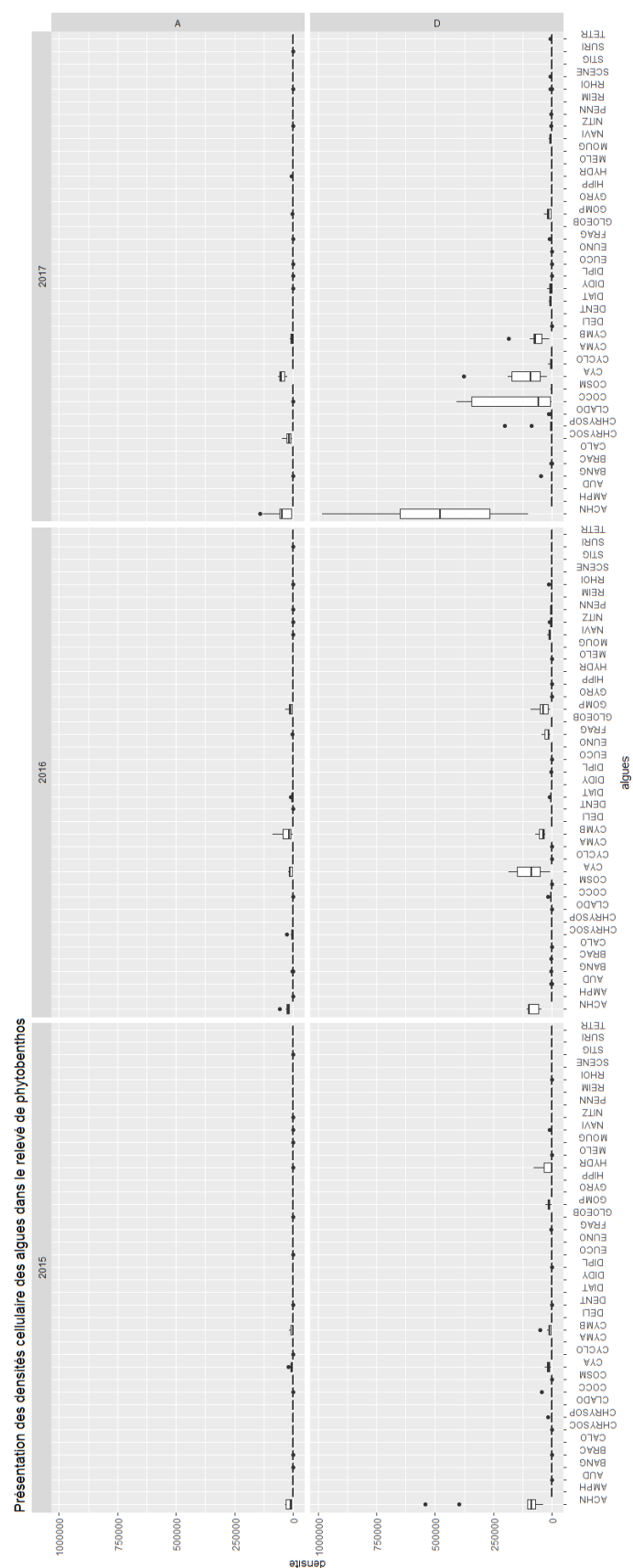
Annexe 7 : Présentation de l'Indice de Strauss calculé pour l'ensemble des algues pour l'étude des 24 Oligoneuriella en Mai 2016



Annexe 8 : Présentation du total des abondances et des occurrences des 53 contenus étudiés pour l'analyse des effets station, année et taxon.

	Contenus			
	Abondance	Occurrence		
Algue rouge filamenteuse				
AUD	106	6		
BANG	50	1		
Algue verte filamenteuse				
AVF	316	26		
AVFR	5	1		
CHAET	9	1		
OEDO	17	2		
OEDOG	19	1		
SPIRO	209	18		
ULOT	159	6		
CLADO				
MOUG				
STIG				
Algue verte unicellulaire				
AVS	33	2		
AVU	20	7		
CHLA	1	1		
CLOS	12	4		
COSM	181	34		
OOCY	6	4		
SCENE	7	2		
STAU	26	13		
CHRYSOC				
CHRYSOP				
HYDR				
TETR				
Algue indéterminée				
AF	13	5		
AI	11	6		
Cyanobactérie				
CYA	193	9		
Diatomée				
ACHN	3769	48		
AMPH				
BRAC				
CALO				
COCC	580	45		
CYCLO	459	45		
CYMA				
CYMB	1394	52		
DELI				
DENT				
DIAT	117	25		
DIDY	4	2		
DIPL	12	8		
EUCO				
EUNO	2	2		
FD	14264	53		
FRAG	504	41		
GOMP	2725	51		
GYRO				
HIPP				
MELO	5	1		
MERI	194	27		
NAVI	307	34		
NITZ	68	27		
PENN				
REIM				
RHOI	41	16		
SURI	1	1		
	Présente exclusivement sur le terrain			
	Présente exclusivement dans les contenus			

Annexe 9 : Présentation des densités cellulaires du phytobenthos sur la l'Asse et la Durance en Mai 2015, 2016 et 2017



Annexe 10 : Présentation de l'Indice de Strauss calculé pour l'ensemble des algues pour l'étude sur le jeu de données comprenant trois années, deux stations et trois taxons

