



Intitulé du diplôme

MASTER BIOLOGIE

Spécialité
**DYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES
AQUATIQUES**

Dossier 2 bis

Mémoire ou rapport professionnel

Mémoire

CANDIDAT

NOM : **ALBERT**

PRÉNOM : **Luc**

NOM d'usage ou marital :



**Etude de l'évolution des peuplements
de macroinvertébrés benthiques
de la Sorgue amont entre 1988 et 2014**



L'excursus de la Sorgue (Luc ALBERT)



Résumé

Les préoccupations mondiales concernant la qualité de la ressource en eau et les changements climatiques renvoient malheureusement à une croissance, ces dernières décennies, des pressions anthropiques sur les écosystèmes. Les modifications structurelles des communautés aquatiques, et notamment des invertébrés benthiques, en sont le reflet.

Comme tout hydrosystème fluvial, la Sorgue s'insère dans ce schéma en ayant comme particularité un bassin d'alimentation karstique lui procurant des eaux fraîches et un soutien d'étiage tout au long de l'année. L'objectif de cette étude était de caractériser l'évolution, entre 1988 et 2014, de la qualité des eaux de la haute Sorgue à travers l'analyse des peuplements de macro-invertébrés benthiques. Dans un premier temps, ce travail a permis de mettre en lumière les premiers signes de dégradation du cours d'eau au milieu des années 90. La disparition du plécoptère *Dinocras*, taxon le plus sensible à la pollution, et l'augmentation relative de la conductivité en sont le résultat. Dans un second temps, la focalisation de l'analyse sur un jeu de données allant de 2005 à 2014 a permis de dévoiler la sensibilité des peuplements à l'hydrologie. La réponse structurelle des communautés lors de la période sèche 2005-2008 renvoie à une annulation du gradient longitudinal classiquement établi. L'I₂M₂ classe cette partie du cours d'eau en bon état et non pas en très bon état comme l'IBGN. Il exprime, grâce à son outil diagnostique, des probabilités d'altérations élevées de la qualité de l'eau durant cette période sèche et des probabilités d'altérations croissantes, depuis 2009, de la qualité de l'habitat environnant.

Mots clefs : *Dinocras*, IBGN, I₂M₂, karst, macroinvertébrés, réponse structurelle, Sorgue, variabilité interannuelle.

Abstract

In the last decades, global concern about water resources quality and about global warming has sharpened our realization of an increasing anthropic disturbance upon ecosystems. Among others, adverse consequences are structural responses in aquatic communities, and more specifically, in macrobenthic invertebrates. The Sorgue river is altered as any running water ecosystem, but shows characteristics of a stream fed by a karstic watershed, providing cool waters and low flow support all year round. The purpose of this study is to understand the evolution of the water quality in the upper Sorgue river from 1968 to 2014 using macrobenthic communities analysis. First, this study gave us insights upon the first evidences of stream alteration, in the mid-90's. The main consequences are the loss of *Dinocras* (plecoptera), the most pollution-sensitive taxa, and a relative rise in water conductivity. In a second part, the study focuses on data from 2005 to 2014 and revealed the benthic population sensitivity to water levels. The structural response of macrobenthic communities to the 2005-2008 drought is a loss of the standard succession of upstream-downstream typological levels. The ecological quality of this part of the stream is assessed as «good» by the I₂M₂ index when it is described as «very good» by the IBGN index. The I₂M₂ diagnostic tool reveals high probabilities of water quality degradation during this period of drought, and increasing degradation probabilities in habitat quality since 2009.

Key words : *Dinocras*, IBGN, I₂M₂, karst, macroinvertebrates, structural response, Sorgue river, inter-annual variability

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à remercier Yann Lalanne qui m'a accompagné tout au long de cette aventure ainsi que Frank D'Amico pour m'avoir fait confiance en me permettant de réaliser cette VAE. Je remercie également toutes les personnes de la DREAL PACA qui m'ont soutenu administrativement dans cette démarche : Laurence Durand, Paul Picq et Séverine Lopez.

Je voudrais témoigner toute ma gratitude aux hydrobiologistes que j'ai côtoyés ces dernières années et avec qui j'ai pu partager cette passion : Elise Carnet, Christine Dupart, Véronique Vassal, Christian Lalanne-Cassou, Yannick Letet, Luc Barbe, Célia Ribéra, Alban Gerbault, Jean-Julien Lepeut, Julien Achard, Daniel Julien, Muriel De-Basquiat &co, Rémi Lartigue, Fabrice Parais, Serge Gachelin, Henri Legrand, Raymond Allasio, Arnaud Rocard, Jean-François Ricou, Guillaume Médérel, Laurent Souchaud, Michael Cagnant, Marc Le Baron, Fabrice Laval, Philippe Moulec, Philippe Baffie, Bernard Dumont, Gaït Archambaud, Adrien Morel, Julien Dublon, Delphine Rebière, Tiphaine Péroux, Gwénolé Le Guellec ...

Je remercie également les spécialistes de l'OPIE, Jacques Le-Doaré, Michel Brulin, Gennaro Coppa et Henri Tachet avec qui j'ai pu échanger longuement sur les espèces présentes en PACA.

Je tiens à remercier par ailleurs tous mes collègues du Groupe National de Qualité des Eaux que je n'ai pas encore cités, les agents de l'ONEMA (DIR 8 et SD 05 et 84 notamment), et ceux de l'IRSTEA du Tholonet que je fréquente depuis 6 ans maintenant.

Merci aux hydromètres de la DREAL PACA ainsi qu'à Guy Valencia.

Merci à ceux qui ont pris le temps de s'intéresser de près à cette étude, Michaël, Fabrice, Gwénolé, Christian, Luc, Guillaume, Laurent et à Noëlle et Benoit pour leurs cours.

Et enfin merci à la famille et aux amis, Eliette, Hélène, Sabrina, Michaël...

Glossaire

ACC	Analyse canonique des correspondances
ACP	Analyse en composantes principales
AFC	Analyse factorielle des correspondances
AFM	Analyse factorielle multiple
ASPT	Average Score Per Taxon
B1	Bocal 1
CAH	Classification ascendante hiérarchique
CEMAGREF	Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
EQR	Ecological Quality Ratio
GFI	Groupe faunistique indicateur (IBGN)
IBGN	Indice Biologique Global Normalisé (norme NF T90-350)
IB	Indice biotoque
I₂M₂	Indice invertébrés multi-métriques
IRRs	Impacted River Reaches
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
LEMA	Loi sur l'eau et les milieux aquatiques
LIRRs	Least Impacted River Reaches
MP6	Moyen/Petit méditerranéen
MRE	Maison Régionale de l'Eau
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PACA	Provence-Alpes-Côte-D'azur
PhA	Phase A
QJM	Débits journalier moyen
QMNX	Débit moyen mensuel minimum ayant une chance sur X de ne pas être dépassé une année donnée
RCB	Réseau Complémentaire de Bassin
RCS	Réseau de contrôle et surveillance
REF	Réseau de référence
RRP	Réseau de référence pérenne
SMBS	Syndicat Mixte du Bassin des Sorgues

Table des figures	2
Table des tableaux	3
Introduction	5
Chapitre I : Situation et description du bassin de la Sorgue	6
1. Géologie et hydrologie	6
1.1 Un bassin d'alimentation karstique.....	6
1.2 Une hydrologie atypique en région méditerranéenne.....	7
1.3 Un réseau complexe	8
1.4 Un territoire aux fortes pressions	9
2. Climat.....	10
Chapitre II : Matériel et méthodes	11
1. Station étudiée : Sorgue des Capucins à Fontaine-de-Vaucluse 06123700	11
2. Les indices « invertébrés »	12
2.1 Historique	12
2.2 Méthodologie des prélèvements depuis 2005	14
2.3 L'indice biologique global version Directive Cadre sur l'Eau (IBG DCE).....	15
2.4 L'indice invertébrés multi-métriques (I ₂ M ₂).....	16
3. Outils statistiques	20
Chapitre III : Résultats et discussions	26
1. Analyse de la chronique 1988-2014	26
1.1 L'Indice Biologique Global Normalisé.....	26
1.2 Caractérisation des prélèvements à partir des présences et absences.....	27
1.2.1 Evolution de la structure des peuplements.....	28
1.2.2 Evolution des paramètres hydrologiques et physico-chimiques	30
1.2.3 Evolution de la composition faunistique selon les paramètres abiotiques	32
1.3 Discussion des résultats de l'analyse de la chronique 1988-2014	33
2. Analyse de la chronique 2005-2014	34
2.1 Evolution des scores de qualité et des mesures de la diversité	34
2.1.1 Indices de diversité.....	34
2.1.2 Indice Invertébrés Multi-Métriques (I ₂ M ₂)	35
2.1.3 Outil diagnostique de l'I ₂ M ₂	37
2.2 Caractérisation des prélèvements à partir des effectifs	38
2.2.1 Evolution de la structure des peuplements.....	38
2.2.2 Effet de saisonnalité	40
2.2.3 Evolution des paramètres hydrologiques et physico-chimiques	41
2.2.4 Evolution de la composition faunistique selon les paramètres abiotiques	42
2.2.5 Evolution de la structure faunistique et de l'organisation des traits bio-écologiques des peuplements en fonction des paramètres abiotiques.....	43
2.3 Discussion des résultats de l'analyse de la chronique 2005-2014	45
Conclusion et perspectives	46
Références bibliographiques	47
Annexes	53

Table des figures

Figure 1 : Carte de la situation géographique de la Sorgue.....	6
Figure 2 : Photo du gouffre débordant le 30 avril 2013 pour un débit de 35.30 m ³ /s	7
Figure 3 : Graphique des débits journaliers moyens du Sorgomètre 1988- 2015	7
Figure 4 : Schéma du réseau des Sorgues, source SMBS : http://www.lasorgue.com/telechargements/le-reseau-des-sorgues consulté en août 2015	8
Figure 5 : Carte de l'occupation du sol du bassin versant des Sorgues, DREAL PACA, L. Dallari.....	9
Figure 6 : Climatogramme des moyennes mensuelles des températures et d'ensoleillement pour la station météorologique de Carpentras située à une quinzaine de kilomètres du bassin et possédant un climat quasi-identique www.meteofrance.com consulté en août 2015	10
Figure 7 : Diagramme ombrothermique pour la station météorologique de Carpentras www.meteofrance.com consulté en août 2015.....	10
Figure 8 : Photo aérienne de la station 06123700 Sorgue à Fontaine-de-Vaucluse, IGN, Geoportail.gouv.fr	11
Figure 9 : Organigramme résumant la méthodologie de l'analyse des données	21
Figure 10 : Graphique de l'évolution de l'IBGN et ses composantes pour la station de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse de 1988 à 2014.....	26
Figure 11 : Représentation simultanée, sur le premier plan principal de l'AFC, des dates de prélèvements et des indicatrices des taxons les plus contributifs et les mieux représentés	28
Figure 12 : Dendrogramme de la CAH réalisée à partir des résultats de l'AFC, représentant les dates de prélèvements regroupées en 4 classes principales grâce à la méthode de Ward.....	28
Figure 13 : Nuage de points de tous les relevés existants des paramètres abiotiques en fonction du temps : température (°C), oxygène dissous (mg/L), pH, conductivité à 25°C (µS/cm), nitrates (mg(NO ₃)/L), le minimum des débits journaliers moyens (QJM) des 60 jours précédant le prélèvement.....	30
Figure 14 : Nuage des dates de prélèvements et cercle des corrélations des variables abiotiques du premier plan principal de l'ACP	30
Figure 15 : Graphique des corrélations de Pearson entre les variables abiotiques.....	31
Figure 16 : Représentation simultanée des dates de prélèvements, des taxons et des variables abiotiques de l'ACC	32
Figure 17 : Graphique de l'ensemble des nuages de points de chaque indice calculés sur la somme des 12 prélèvements unitaires et leurs dispersions	34
Figure 18 : Effectifs en milliers du genre Gammarus en milliers d'individus	34
Figure 19 : Graphique des corrélations des indices de diversité	34
Figure 20 : Graphique de l'ensemble des nuages de points des valeurs de chaque métrique, en rouge la pire valeur observée dans le jeu de données de construction de l'indice et en bleu la valeur de référence pour le type CEMAGREF MP6.....	36
Figure 21 : Graphique des valeurs d'I ₂ M ₂ pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005 et délimitations des limites de classe d'état pour le paramètre invertébrés en type CEMAGREF MP6	36
Figure 22 : Représentation simultanée, sur le premier plan principal de l'AFC, des dates de prélèvements et des taxons les plus contributifs et les mieux représentés	38
Figure 23 : Dispersion des effectifs des taxons Ephemereella 450 et Esolus 619 montrant des valeurs extrêmes.....	39
Figure 24 : Représentation, sur le premier plan principal de l'AFCinter-saison, des barycentres des périodes de prélèvements (à gauche), des taxons (en haut à droite) et des prélèvements (en bas à droite).....	40

Figure 25 : Nuage des dates de prélèvements de 2005-2014 et cercle des corrélations des variables abiotiques du premier plan principal de l'ACP expliquant 64% de l'inertie totale..	41
Figure 26 : Graphique des débits journaliers moyens du Sorgomètre de 2004 à 2014.....	41
Figure 27 : Représentation simultanée des dates de prélèvements, des indicatrices des taxons et des variables abiotiques de l'ACC	42
Figure 28 : Représentation sur le premier plan principal de l'analyse RLQ des modalités des « variables traits » (en haut), des prélèvements (en bas à gauche), des taxons (en bas au milieu) et des variables abiotiques (en bas à droite).....	43

Table des tableaux

Tableau I : Evolution des indices invertébrés mis en application en France de 1967 à nos jours	12
Tableau II : Caractéristiques des modes de prélèvements et d'analyses des listes taxonomiques de la Sorgue des Capucins 06123700	13
Tableau III : Fréquence d'apparition des taxons dans les 21 prélèvements de 1988 à 2014.....	27
Tableau IV : Prélèvements et taxons les plus contributifs à l'axe 1 de l'AFC.....	29
Tableau V : Prélèvements et taxons les plus contributifs à l'axe 2 de l'AFC.....	29
Tableau VI : Prélèvements et paramètres les plus contributifs à l'axe 1 de l'ACP.....	31
Tableau VII : Valeurs des métriques de l' I_2M_2 pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005.....	35
Tableau VIII : Valeurs des métriques en EQR et l' I_2M_2 qui en découle (en vert) pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005.....	35
Tableau IX : Limites inférieures des classes d'état pour le type CEMAGREF MP6	35
Tableau X : Probabilités d'altérations de la qualité de l'eau pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005	37
Tableau XI : Probabilités d'altérations sur la qualité de l'habitat pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005	37
Tableau XII : Prélèvements et taxons les plus contributifs à l'axe 1 de l'AFC.....	38
Tableau XIII : Effectifs des principaux taxons marquant une évolution.....	39

Introduction

La volonté de favoriser la cohérence des politiques aquatiques des pays membres de l'Union Européenne s'est traduite au début des années 2000 par la mise en place de la directive cadre sur l'eau (DCE). Cette directive, retranscrite en droit français dans la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006, a été le point de départ de la refonte du paysage hydrobiologique français.

Les règles d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surfaces sont explicitées dans l'arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010. Cet arrêté stipule que l'indice biologique invertébrés à utiliser est l'indice biologique normalisé (IBGN) de la norme NF T90-350 de mars 2004. A titre complémentaire obligatoire, l'indice invertébrés multi-métriques (I₂M₂) doit être aussi calculé, ce qui implique l'utilisation de protocoles normatifs permettant le calcul de ces deux indices.

La direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Provence-Alpes-Côte-D'azur (DREAL-PACA) a la charge de fournir depuis près de 30 ans l'indice invertébrés en vigueur, c'est-à-dire de prélever et déterminer les taxons pour calculer une note indiciaire caractérisant les stations hydrobiologiques de la région.

La Sorgue, rivière karstique emblématique du Vaucluse, possède sur sa partie amont à Fontaine-de-Vaucluse, une station hydrobiologique qui est suivie depuis 1988.

Les peuplements de cette rivière ont été étudiés ponctuellement (Rambaud, 1974 ; Ollier, 1991, Giudicelli & al., 2000 et 2010), cependant, aucune étude connue ne porte un regard sur l'évolution temporelle des communautés d'invertébrés benthiques.

Or, cette rivière semble faire face à une augmentation constante des pressions ces dernières décennies. Les habitants de ce bassin font régulièrement part de leurs préoccupations quant à la dégradation progressive du secteur amont avec notamment la diminution des stocks d'ombre commun (*Thymallus thymallus*) et de truite fario (*Salmo trutta*).

Ce rapport a alors pour but d'étudier les indicateurs de la qualité biologique d'une rivière que sont les invertébrés benthiques dans le but de réaliser un constat scientifique sur l'évolution temporelle de cette biocénose.

Woodward *et al.* (2015) ont montré que suite à des crues exceptionnelles, il fallait de 3 à 10 ans à la plupart des taxons pour retrouver leurs effectifs initiaux, qu'en parallèle ces crues permettaient l'installation de nouveaux taxons et que la succession d'événements extrêmes crue/sècheresse avait un impact hautement perturbateur sur les communautés en place.

Par ailleurs, Garcia-Roger *et al.* (2013) ont observé que les macro-invertébrés vivant dans les cours d'eau permanents méditerranéens présentaient des traits de cycles de vie longs alors que ceux vivant dans des cours d'eau intermittents avaient des traits de cycles de vie courts.

A travers l'étude des communautés d'invertébrés et des facteurs environnementaux, des signes d'évolutions de la qualité des eaux de la Sorgue et de l'habitat environnant sont-ils perceptibles ?

Après avoir décrit le bassin de la Sorgue puis la méthodologie de l'étude, ce rapport mettra en évidence dans un troisième temps, à partir d'une chronique de données allant de 1988 à nos jours, les causes potentielles d'apparitions ou de disparitions de taxons. Enfin, l'étude plus spécifique de la chronique 2005-2014 sera réalisée en analysant les compositions faunistiques établies à partir de la mise en œuvre d'un même protocole et leurs significations en termes de qualité du milieu.

Chapitre I : Situation et description du bassin de la Sorgue

1. Géologie et hydrologie

1.1 Un bassin d'alimentation karstique¹

La Sorgue tire son originalité de son fonctionnement hydrogéologique. Cours d'eau à régime de soutien karstique, elle est alimentée par un vaste aquifère souterrain lui-même interconnecté à la surface terrestre correspondant au bassin d'alimentation. Du flanc sud du Mont Ventoux et de la Montagne de Lure au bassin d'Apt-Forcalquier, c'est plus de 1200 km² d'un impluvium (en jaune sur la figure 1) qui recueille des précipitations de l'ordre de 620mm/an à plus de 1000mm/an. Le volume des infiltrations y est par conséquent considérable. L'écoulement de l'aquifère se fait ensuite selon un axe principal Est / Ouest et trouve pour exutoire, à plus de 95% de son volume et au plus tard 3 mois après l'infiltration, la Fontaine de Vaucluse, exsurgence de cette rivière.



Figure 1 : Carte de la situation géographique de la Sorgue

Ce système karstique fait de la Sorgue une rivière vulnérable (Bakalowicz, 1999 ; Blondel, 2008) aux pollutions de son bassin d'alimentation à cause du faible rôle filtrant de celui-ci et de l'absence de capacité auto-épuratrice de l'aquifère. *A contrario*, ce même système, grâce à son rôle tampon sur les crues, son rôle sténothermique et son soutien naturel d'étiage, permet de limiter l'impact de certains effets néfastes sur les communautés biocénétiques.

¹ http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/eaux_souterraines/SyntheseHydro2014/Fiches/PAC06F.pdf consulté en août 2015.

1.2 Une hydrologie atypique en région méditerranéenne

Le gouffre (figure 2) étant le seul exutoire de ce vaste réseau, l'écoulement de la Sorgue est permanent. Le débit journalier minimal enregistré depuis 1970 a été de $2,74 \text{ m}^3/\text{s}$ le 19 novembre 2007. La rivière ne souffre donc d'aucun assec. Son QMNA5 (débit moyen mensuel minimum ayant une chance sur cinq de ne pas être dépassé une année donnée ou autrement dit 4 chances sur 5 d'être dépassé) est de $4.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Lors des étiages, seuls les griffons, sources pérennes situées en aval du gouffre, alimentent la rivière et dès que la hauteur d'eau atteint la côte de 21.07m au Sorgomètre (échelle de mesure située dans le gouffre dont le 0 est à une altitude de 84.45m), soit un débit équivalent à $21 \text{ m}^3/\text{s}$, le trop plein jaillit.



Figure 2 : Photo du gouffre débordant le 30 avril 2013 pour un débit de $35.30 \text{ m}^3/\text{s}$

Les débits journaliers moyens de la Sorgue à la station hydrométrique du Sorgomètre sont représentés dans la figure 3.

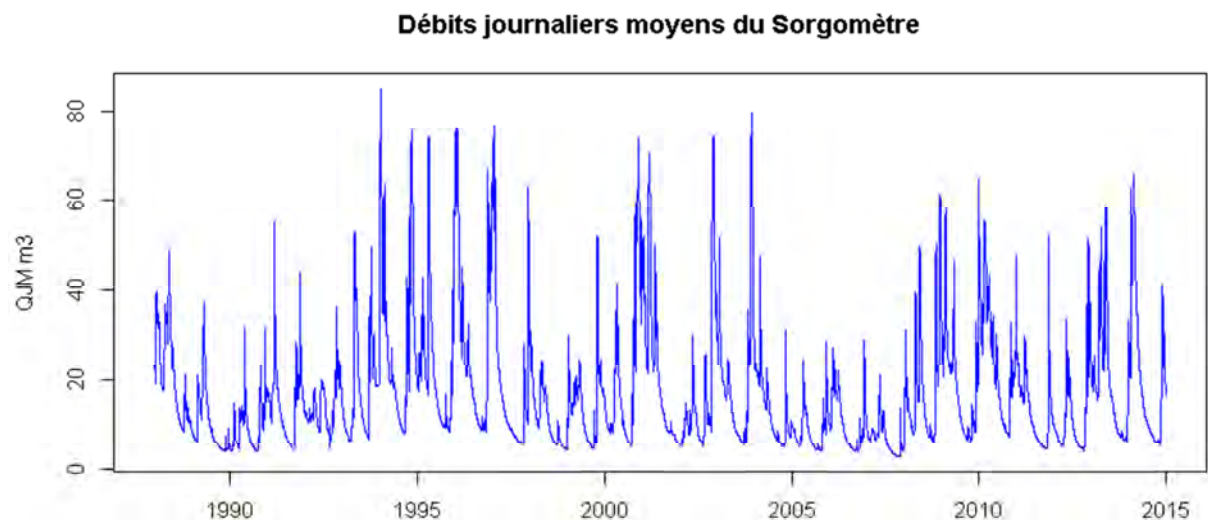


Figure 3 : Graphique des débits journaliers moyens du Sorgomètre 1988- 2015

Les débits maximums peuvent atteindre plus de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ comme cela fut le cas le 11 janvier 1994 avec $85 \text{ m}^3/\text{s}$ sachant que la crue décennale (probabilité d'apparition sur une année de 0.1) est de $78 \text{ m}^3/\text{s}$.

Des alternances de périodes sèches et humides sont à première vue identifiables. Elles sont le signe d'une double variabilité saisonnière et interannuelle.

1.3 Un réseau complexe

La Sorgue (figure 4) jaillit à 106m d'altitude puis arrive en amont du village de Fontaine-de-Vaucluse, 200m à l'aval de l'exurgence, à 80m d'altitude. La pente de ce secteur est donc très prononcée, de l'ordre de 13%. Dès lors, ce secteur amont se divise et se reforme plusieurs fois sur 6.5 km jusqu'au partage des eaux à l'Isle-sur-la-Sorgue, créant ainsi de nombreux îlots. C'est ce secteur qui sera principalement étudié.

Schéma représentant l'hydrographie du réseau des Sorgues



Figure 4 : Schéma du réseau des Sorgues, source SMBS : <http://www.lasorgue.com/telechargements/le-reseau-des-sorgues> consulté en août 2015

Les secteurs médian et aval sont quant à eux caractérisés par 2 bras principaux de plus de 25km chacun : au nord-est, la Sorgue de Velleron et au sud-ouest, la Grande Sorgue (dénommée Sorgue d'Entraigues en son aval) qui se rejoignent à Entraigues pour se jeter dans l'Ouvèze à hauteur de Bédarrides.

1.4 Un territoire aux fortes pressions

Le bassin versant physique (topographique) est un territoire subissant une forte pression agricole (en jaune sur la figure 5) et une artificialisation croissante (en rouge). La pression anthropique y est importante ; l'Isle-sur-la-Sorgue, par exemple, principale ville du secteur médian, compte près de 19000 habitants.

Seule la partie amont du bassin reste préservée.

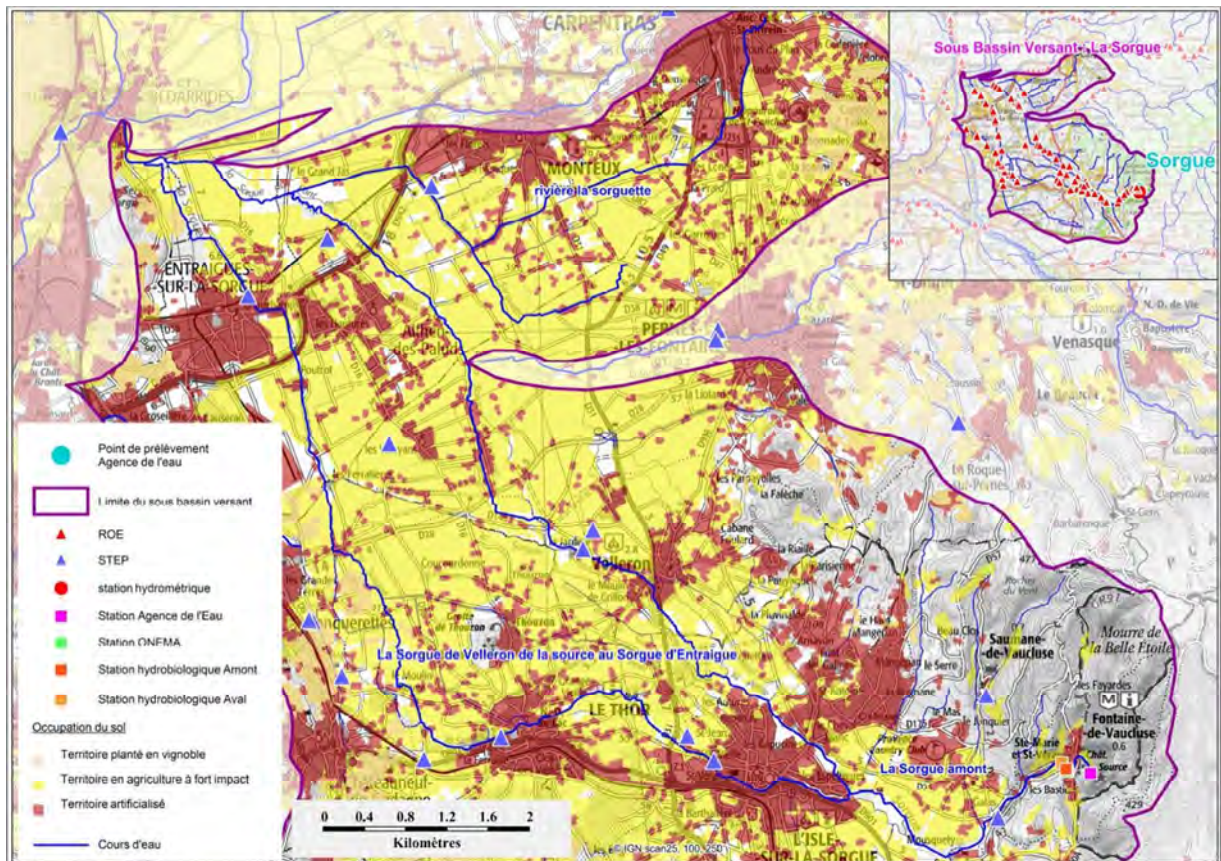


Figure 5 : Carte de l'occupation du sol du bassin versant des Sorgues, DREAL PACA, L. Dallari

La Sorgue a été façonnée par l'homme dès l'époque gallo-romaine par des aménagements de drainage de la plaine marécageuse, puis la potentialité énergétique a permis, au moyen âge, l'installation de nombreux moulins à eau avec roues à aubes.

En terme de continuité, les obstacles à l'écoulement sont donc très nombreux du fait de ces anciennes activités économiques basées sur l'énergie hydraulique (filatures, papeteries...) mais aussi du fait d'un réseau d'irrigation important qui a permis le développement de l'agriculture. La morphologie du cours d'eau en est fortement impactée.

Les triangles rouges de l'encadré de la carte sont tous les obstacles à l'écoulement identifiés sur le réseau des Sorgues.

2. Climat

Le bassin de la Sorgue est sous influence méditerranéenne, il est donc caractérisé à la fois par

- des hivers doux et des étés secs et chauds (figure 6) ;

Données climatiques de la station de Carpentras

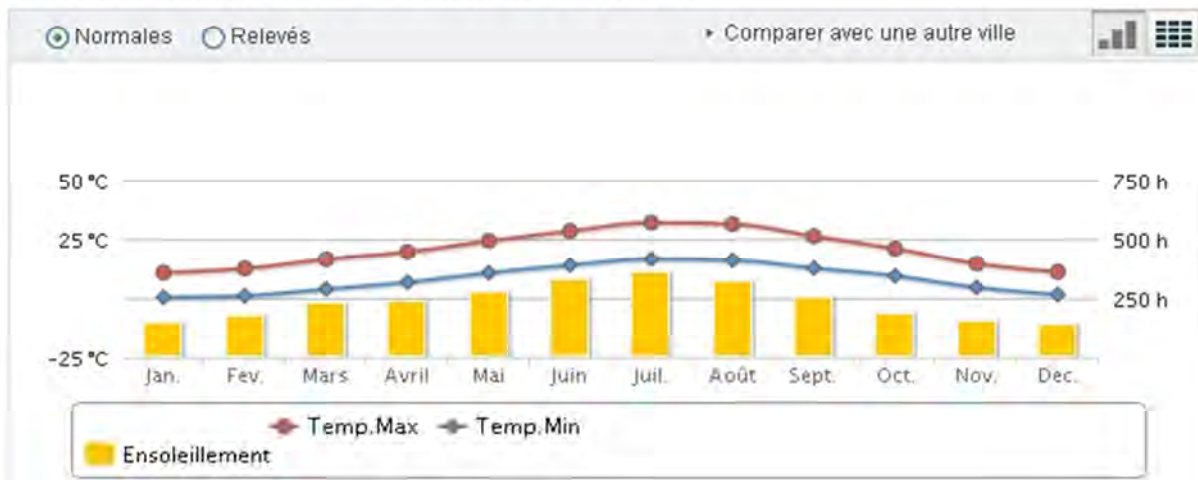


Figure 6 : Climatogramme des moyennes mensuelles des températures et d'ensoleillement pour la station météorologique de Carpentras située à une quinzaine de kilomètres du bassin et possédant un climat quasi-identique www.meteofrance.com consulté en août 2015

- et des précipitations se répartissant principalement au printemps et à l'automne (figure 7).

Données climatiques de la station de Carpentras

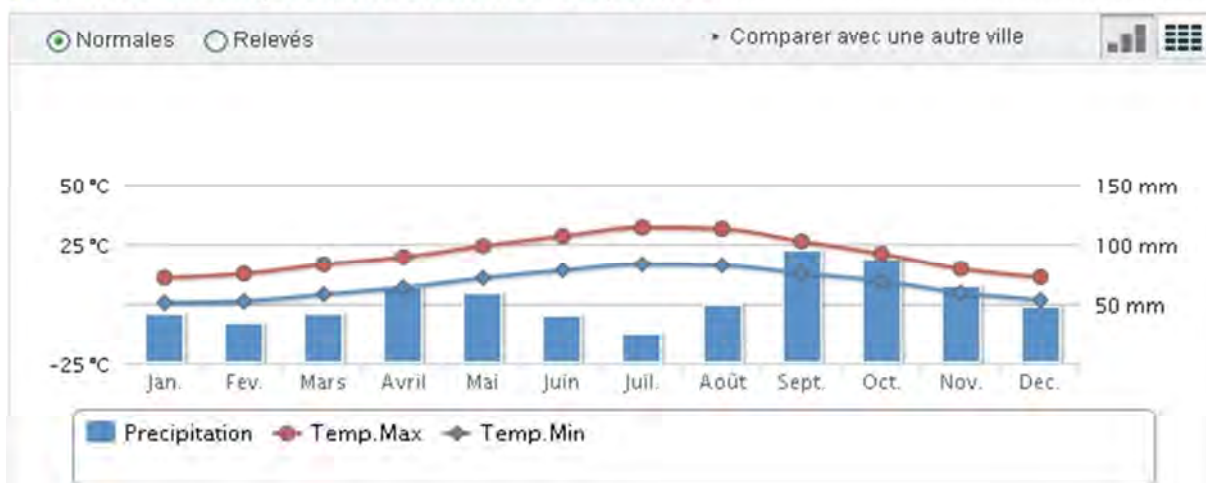


Figure 7 : Diagramme ombrothermique pour la station météorologique de Carpentras www.meteofrance.com consulté en août 2015

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Station étudiée : Sorgue des Capucins à Fontaine-de-Vaucluse 06123700

La Sorgue a toujours été une rivière suscitant la curiosité. Pour cette raison, elle a fait l'objet de nombreuses études et explorations de son gouffre à partir du XIX^{ème} siècle. Nello Ottonelli par exemple a été le premier à réaliser une descente en 1878, il fut suivi par de nombreux autres scientifiques comme Jacques-Yves Cousteau notamment.

La première échelle limnimétrique, nommée le Sorgomètre, fut installée dans la vasque vers 1850 et les données hydrologiques de 1966 à nos jours sont consultables en ligne sur le site de la banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

D'un point de vue qualitatif, c'est depuis 1987-1988 que la Sorgue est suivie régulièrement *via*, tout d'abord, le Réseau Complémentaire de Bassin (RCB) qui était un réseau mis en place par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse en complément du Réseau de suivi National de Bassin. Ce réseau a permis le suivi, tous les 3 trois ans environ, de deux stations :

- la Sorgue des Capucins à Fontaine de Vaucluse dont le code station est 06123700
- la Sorgue de Velleron à Foulquette sur la commune de l'Isle-sur-la-Sorgue 06124000

Les paramètres mesurés étaient à la fois biologiques (invertébrés) et physico-chimiques (conductivité, pH...).

Suite à la DCE, les réseaux de contrôle de surveillance (RCS) et de référence (REF puis RRP), ont succédé au RCB. La fréquence des relevés est devenue annuelle.

Le RRP a pour objectif de fixer la référence pour le type de masse d'eau représenté et suivre son évolution dans le temps alors que le RCS sert, lui, à évaluer l'état des eaux sur le long terme en le confrontant à la référence.

La station de la Sorgue des Capucins (figure 8) est située, pour le paramètre invertébrés, à l'hôtel du Poète aux coordonnées suivantes (en Lambert 93) :

X Amont(m) : 870697 Y Amont (m) : 6315784
X Aval (m) : 870610 Y Aval (m) : 6315907



Figure 8 : Photo aérienne de la station 06123700 Sorgue à Fontaine-de-Vaucluse, IGN, Geoportail.gouv.fr

Elle appartient à la masse d'eau FRDR384a et fait partie des cours d'eau de taille petite et d'hydroécologie méditerranéenne (6). La classification, dénommée « type cemagref », qui en découle est donc MP6, signifiant Moyen/Petit méditerranéen.

2. Les indices « invertébrés »

2.1 Historique

Les invertébrés sont utilisés depuis longtemps pour évaluer la qualité biologique des cours d'eau français (Reyjol *et al.*, 2012). Des prélèvements permettent la construction de listes taxonomiques qui servent ensuite à la construction d'indices. Dès 1967, Verneaux et Tuffery ont mis au point le premier indice pour permettre d'appréhender la qualité d'un cours d'eau grâce aux invertébrés présents. Une évolution progressive s'ensuivit (tableau I).

Tableau I : Evolution des indices invertébrés mis en application en France de 1967 à nos jours

	Indice Biotique IB Verneaux et Tuffery 1967	Indice de Qualité Biologique Globale IQBG Verneaux <i>et al</i> 1976	Indice Biologique Global IBG Verneaux <i>et al</i> 1982, normalisé en 1985
Surface du micro-prélèvement	0.0929 m ² (soit environ 1/10 m ²)	0.0929 m ² (soit environ 1/10 m ²)	1/20 m ²
Maille filet	300 µm	300 µm	500 µm
Nb de micro-prélèvements	3 lotiques 3 lentiques	6	8 par ordre d'habitabilité (nombre variable suivant les stations)
Niveau détermination	Unité systématique variable : ordre à genre	Unité systématique variable : ordre à genre	Unité taxonomique : famille
Nb de taxons utilisés			135 dont 38 indicateurs
Note	/10	/20	/20

	Indice Biologique Global Normalisé IBGN 1992	Indice Biologique Global Normalisé équivalent IBG DCE	Indice Invertébrés Multi-Métriques I ₂ M ₂ Usseglio <i>et al</i> 2014 (projet)
Surface du micro-prélèvement	1/20 m ²	1/20 m ²	1/20 m ²
Maille filet	500 µm	500 µm	500 µm
Nb de micro-prélèvements	8 par ordre d'habitabilité	12 : 4 marginaux et 4 dominants par ordre d'habitabilité servant au calcul d'un IBGN + 4 dominants	12 : 4 marginaux, 4 + 4 dominants (norme terrain septembre 2009)
Niveau détermination	Unité taxonomique : famille	Unité taxonomique : genre	Unité taxonomique : genre
Nb de taxons utilisés	138 dont 38 indicateurs	152 dont 38 indicateurs	Environ 350 (norme laboratoire juin 2010)
Note	/20	/20	/1

Cette évolution, bénéfique pour la pertinence du jugement de la qualité des cours d'eau à l'aide des invertébrés, rend l'analyse chronologique plus délicate. Certes, le changement de maille du filet et la diminution de la taille du surber ont peu d'importance mais, à l'opposé, l'augmentation du nombre de micro-prélèvements, le choix des substrats à prélever (soit au hasard soit orienté par un plan d'échantillonnage) et la recherche de nouveaux taxons engendrent des biais importants dans l'analyse temporelle des listes (Wiederkehr, 2015).

Tableau II : Caractéristiques des modes de prélèvements et d'analyses des listes taxonomiques de la Sorgue des Capucins 06123700

	1988 à 1999	2001 à 2003	2005 à 2015
Méthode	IB	IBGN	IBG DCE – compatible I ₂ M ₂
Matériel de terrain	Surber 1/10 m ² à 300 µm	Surber 1/20 m ² à 500 µm	Surber 1/20 m ² à 500 µm
Comptage	En classes d'abondances (non définies)	Dénombrement	Dénombrement
Détermination max	Genre	Famille	Genre (ramenée à la famille pour le calcul de la note « équivalent IBGN »)

Jusqu'en 1999, seules des classes d'abondances étaient retranscrites (tableau II). C'est pour cette raison que les analyses de la chronique 1988 à 2014 (qui s'effectuèrent sur un tableau des présences/absences des taxons), se distingueront des analyses de la chronique 2005-2014 (qui s'effectuèrent, elles, sur un tableau des dénombrements de taxons).

Depuis 2005, ont été produites des listes faunistiques qui permettent à la fois de calculer un « équivalent IBGN » (les 8 premiers micro-prélèvements ramenés à un niveau taxonomique supérieur : principalement la famille) et un I₂M₂ (l'ensemble des 12 micro-prélèvements déterminés principalement au genre).

2.2 Méthodologie des prélèvements depuis 2005

En 2005, avec la définition du Réseau de Référence, le premier protocole de prélèvement des macro-invertébrés à 12 relevés unitaires (micro-prélèvements) a vu le jour (Usseglio-Polatera & Wasson, 2005).

Le but était de définir précisément l'état de référence en établissant des peuplements de référence par type de cours d'eau tout en préparant la future méthode d'évaluation (I₂M₂) compatible avec les exigences de la DCE.

La circulaire DCE 2007/22 du 11 avril 2007, relative au protocole de prélèvement et de traitement des échantillons des invertébrés pour la mise en œuvre du programme de surveillance sur cours d'eau, est un dérivé du protocole mis en œuvre sur le réseau de référence. Elle a alors permis d'étendre cette technique à tout le réseau.

Actuellement les normes AFNOR XP T90-333 (septembre 2009) "*Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes*" et XP T 90-388 (juin 2010) "*Traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro-invertébrés de cours d'eau*" sont les deux normes applicables pour le paramètre invertébrés.

D'un point de vue technique simplifié, sont effectués :

- 4 prélèvements unitaires (micro-prélèvements) dans les supports marginaux (recouvrement inférieur à 5%) selon l'ordre d'habitabilité (capacités biogènes) regroupés en 1 seul contenant dénommé phase A (PhA) ou bocal 1 (B1),
- 4 prélèvements unitaires dans les habitats dominants (recouvrement supérieur ou égal à 5%) selon l'ordre d'habitabilité en regroupés en 1 seul contenant dénommé phase B (PhB) ou bocal 2 (B2),
- 4 prélèvements unitaires dans les habitats dominants en privilégiant la représentativité des substrats regroupés en 1 seul contenant dénommé phase C (PhC) ou bocal 3 (B3).

Un exemple de fiche terrain est exposé à l'annexe 1.

La détermination, plus précise que pour le simple calcul de la note IBGN, se fait en fonction des taxons, de l'ordre pour certains (Hydracariens) au genre pour d'autres (Plécoptères, Trichoptères, Ephéméroptères...).

Cette évolution permet notamment d'augmenter l'effort d'échantillonnage sur les substrats dominants (rajout d'une phase C par rapport à l'IBGN) et de faire intervenir de manière plus fine les traits bio-écologiques des taxons.

2.3 L'indice biologique global version Directive Cadre sur l'Eau (IBG DCE)

Dans le but de ne pas perdre la chronique de données, ces nouveaux protocoles permettent de calculer un équivalent IBGN, c'est-à-dire un IBG DCE.

A partir de la liste taxonomique produite², seuls les taxons des phases A et B sont alors conservés pour le calcul, et la détermination taxonomique est ramenée à la famille pour utiliser ainsi la méthode de calcul décrite dans la norme NF T 90-350 de 2004.³

Une fois la note indicielle calculée, la classe de qualité écologique pour le paramètre invertébrés est fixée en fonction du type cemagref. La Sorgue étant du type cemagref MP6, elle est en bon état pour ce paramètre à partir de la note de 14 puis passe en très bon état à partir de 16.

² Annexe 2 : Exemple de liste taxonomique produite suite à un prélèvement

³ Annexe 3 : Tableau servant au calcul de l'indice biologique global normalisé (IBGN)

2.4 L'indice invertébrés multi-métriques (I₂M₂)

Origine⁴ :

La Directive Cadre sur l'Eau a défini les invertébrés benthiques (ainsi que les poissons et les algues benthiques) comme éléments de qualité biologique (EQB) servant à caractériser le suivi de la qualité écologique.

Ce paramètre « invertébrés » doit être évalué grâce à des métriques capables d'intégrer à la fois : la composition taxonomique, l'abondance, la diversité et la sensibilité des taxons.

Une situation de référence représentative de conditions pas ou peu perturbées doit être identifiée pour chaque type de masse d'eau dans le but d'établir des écarts à la référence.

L'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN), encore utilisé en 2015, ne répond pas à toutes ces conditions et notamment, en ne prenant pas en compte l'abondance.

En outre, il reflète mal la représentativité des substrats en se basant principalement sur l'évaluation des capacités biogènes de la station. Par ailleurs, il répond faiblement aux types de perturbations autres que la pollution organique. Enfin, il ne prend pas en compte les particularités typologiques des cours d'eau et n'est pas basé sur un écart à la référence.

Pour répondre aux critères fixés par la DCE, l'Indice Invertébrés Multi-Métriques (I₂M₂) a été développé sous la coordination de Philippe Usseglio-Polatera et Cédric Mondy de l'Université Paul Verlaine de Metz en collaboration avec le pôle ONEMA-IRSTEA de Lyon.

Cet indice a été conçu pour respecter les quatre critères suivants exigés par la DCE :

- La spécificité : fournir une réponse significative pour un maximum de types de pressions anthropiques.
- Le pouvoir de discrimination : discriminer efficacement les sites classés comme étant au moins en bon état et ceux étant au mieux en état moyen (d'après les données abiotiques).
- La stabilité en situation de référence.
- La non redondance : fournir une information non redondante des autres métriques sélectionnées.

Développement :

Cette partie est développée à l'annexe 4.

Les métriques de l'I₂M₂ :

Cet indice est bâti sur cinq métriques, 3 qui décroissent avec l'augmentation des pressions :

- l'indice de diversité de Shannon-Weaver calculé à partir des prélèvements réalisés sur les habitats dominants (B1 + B2)
- la valeur de l'Average Score Per Taxon (ASPT) calculée à partir des prélèvements réalisés sur les habitats dominants (B2 + B3)

⁴

« Invertébrés benthiques : un nouvel outil de bio-indication », 2012, Prieto-Montes, Ferréol, Usseglio-Polatera, Mondy

- la richesse taxonomique (TAX) calculée sur l'ensemble des prélèvements réalisés sur les habitats prélevés (B1 + B2 + B3)

et 2 qui croissent avec l'augmentation des pressions :

- la fréquence relative des espèces polyvoltines calculée à partir des prélèvements réalisés sur les habitats dominants (B1 + B2 + B3)

- la fréquence relative des espèces ovovivipares calculée sur le seul prélèvement B3.

* Indice de diversité de Shannon (Shannon and Weaver 1949)

Cet indice permet de prendre en compte non seulement la richesse taxonomique mais aussi l'abondance relative de chaque taxon (présent dans les micro-prélèvements de substrats dominants) ce qui permet de caractériser l'équilibre d'un peuplement. Calculé en fonction du niveau de détermination requis par l' I_2M_2 , sa formule est

$H'_{SHANNON} = \sum (ni/N) \ln(ni/N)$ (avec ni le nombre d'individus du taxon i et N le nombre total d'individus)

* Average Score Per Taxon (ASPT, Armitage *et al.* 1983)

Cet indice permet d'évaluer la polluo-sensibilité moyenne d'une communauté (substrats dominants) en allouant une note de 0 à 10 à une liste⁵ de 84 familles différentes présentes dans nos cours d'eau (Biological Monitoring Working Party, BMWP).

Le score de toutes les familles présentes est additionné puis divisé par le nombre total de familles pour obtenir une moyenne. $ASPT = BMWP / n^{\circ} \text{ taxa}$.

Cet indice permet d'identifier des stations atteintes de pollution organique ou d'eutrophisation.

* Richesse taxonomique (TAX, Gabriels *et al.* 2010)

Elle correspond, tout simplement, au nombre de taxons (selon le niveau de détermination spécifié) retrouvés dans la station.

* La fréquence relative d'organismes polyvoltins (Tachet *et al.* 2000)

Le polyvoltinisme est la capacité d'une espèce à produire plusieurs générations par an. En ayant un potentiel de reproduction très élevé, cela lui permet de se maintenir dans un milieu perturbé ou de recoloniser un milieu qui a subi une perturbation.

La métrique est calculée en multipliant, par taxon, les fréquences relatives des différentes modalités du trait biologique "nombre de générations" par le logarithme de l'abondance. Ces résultats par taxons sont alors additionnés et transformés en pourcentage. On obtient le pourcentage de chaque modalité pour l'ensemble du peuplement des habitats dominants et seul celui de la modalité « plusieurs générations par an » est préservé pour l' I_2M_2 ⁶.

* La fréquence relative d'organismes ovovivipares (Tachet *et al.* 2000)

L'ovoviviparité permet aux œufs d'incuber dans leur mère et d'éviter ainsi d'être exposés à toutes sortes de menaces extérieures (situation environnementale instable...) au stade de développement le plus vulnérable. Le mode de calcul est identique à la précédente métrique mais seulement sur les substrats dominants les plus représentatifs.

5 Annexe 4

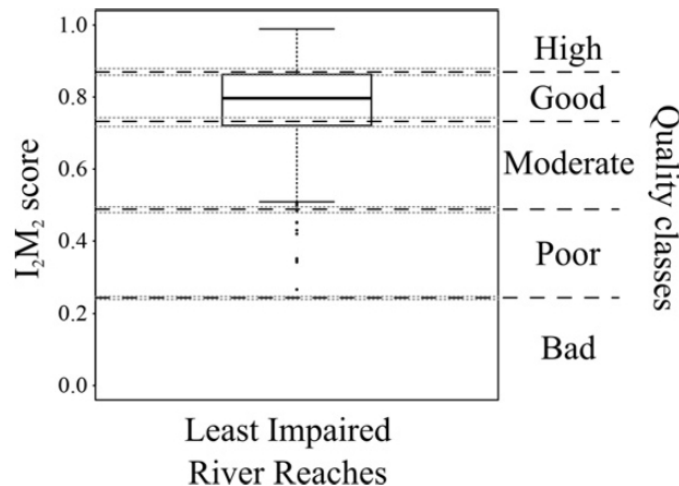
6 Annexe 4

Test de I_2M_2 :

Cette partie est développée à l'annexe 4.

Les limites de classes de qualité :

La DCE recommande d'utiliser des classes de qualité écologique (très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais). Pour cela, la classification est basée sur la distribution des valeurs de l' I_2M_2 dans les sites peu perturbés (Least Impacted River Reaches : LIRRs), les 1^{er} et 3^{ème} quartiles sont considérés comme les limites du très bon état / bon état et du bon état/ état moyen.



Les limites état moyen / état médiocre et état médiocre / état mauvais sont obtenues en divisant, en 3 intervalles d'égale amplitude, l'étendue entre la limite bon état / état moyen et la valeur minimale 0.

Calculs de l'indice I_2M_2 :

Un sous-indice i_2m_2 est calculé pour les 17 types de pression. Il est exprimé par la moyenne des EQR (Ecological Quality Ratio) de chaque métrique pondérée par leur capacité respective à discriminer (DE) les sites perturbés (Impacted River Reaches : IRRs) des sites peu perturbés (Least Impacted River Reaches : LIRRs) pour le type de pression concerné.

$$i_2m_2^{pression} = \frac{\sum (EQR_m^{pression} \times DE_m^{pression})}{\sum DE_m^{pression}}$$

L'indice global est la moyenne des valeurs obtenues avec les 17 sous-indices. Les résultats, exprimés en EQR, ont une valeur comprise entre 0 (mauvais) et 1 (très bon).

$$I_2M_2 = \frac{\sum (i_2m_2^{pression})}{n} ; \text{ (avec } n \text{ le nombre de catégorie)}$$

Exemple de calcul :

Un exemple de calcul est proposé en annexe 4.

Outil diagnostique de l'I₂M₂ :

L'I₂M₂ étant constitué de métriques généralistes permettant l'identification d'un grand nombre de pressions, la nécessité de développer un outil diagnostique complémentaire, pouvant identifier plus précisément les pressions, s'est faite sentir. L'objectif est de proposer un modèle capable, pour chaque type de pression, de calculer la probabilité d'impact de la pression donnée sur une station et cela grâce à l'information apportée par une combinaison de métriques biologiques.

Développement

Les données issues de 1724 sites de stations LIRRs et IRRs ont été utilisées et tous les types de pressions hormis le degré d'anthropisation ont été pris en compte pour le développement de l'outil. 216 métriques biologiques participent à la construction des modèles. Elles peuvent être relatives :

- à la fréquence d'utilisation de modalités de traits biologiques (101 métriques),
- à l'abondance de 42 groupes fonctionnels (42 métriques),
- au niveau de spécialisation ou de diversité... (73 métriques).

La construction de l'outil s'est basée sur des modèles de forêts d'arbres décisionnels (Breiman, 2001).

Au final trois groupes de modèles avec des performances décroissantes ont été identifiés :

- bonnes performances : nitrates et risque de colmatage
- performances correctes : MOOX, matières azotées (hors nitrates), matières phosphorées, micro-polluants minéraux, pesticides, HAP, micro-polluants organiques, ripisylve, urbanisation du bassin versant et instabilité hydrologique
- faibles performances : MES, acidification, voies de communication et taux de rectitude.

Il faut cependant garder à l'esprit qu'il s'agit de probabilités de pressions. Les informations qui peuvent en être tirées doivent rester des orientations de diagnostic et non des preuves tangibles de pressions

Exemple de calcul avec l'outil diagnostique

Un exemple de calcul est proposé en annexe 4.

Tous les résultats d'I₂M₂ et de son outil diagnostique ont été calculés à partir de la version du script⁷ du 17 juin 2013 de Mondy et Usseglio-Polatera.

⁷ Les valeurs peuvent légèrement varier selon les versions

3. Outils statistiques

Un tableau à double entrée recense les prélèvements (en ligne) et les taxons correspondants (en colonne). Cependant, jusqu'en 1999, seules des classes d'abondances étaient retranscrites. De plus, comme évoqué dans le chapitre 2.1 « Historique », les méthodes ont évolué au cours du temps.

C'est pour ces raisons que les analyses de la chronique 1988 à 2014 (qui s'effectueront sur un tableau des présences/absences des taxons au sein des 8 micro-prélèvements des phases A et B), se distingueront des analyses de la chronique 2005-2014 (qui s'effectueront, elles, sur le tableau des dénombrements des taxons présents dans les 12 micro-prélèvements des phases A, B et C).

2 chroniques de données sont donc disponibles :

1988-2014

- 7 variables quantitatives physico-chimiques et hydrologiques
- Tableau de présence/absence des macro-invertébrés

2005-2014

- 11 variables quantitatives physico-chimiques et hydrologiques
- Tableau d'abondance des macro-invertébrés
- Tableau des traits bio-écologiques

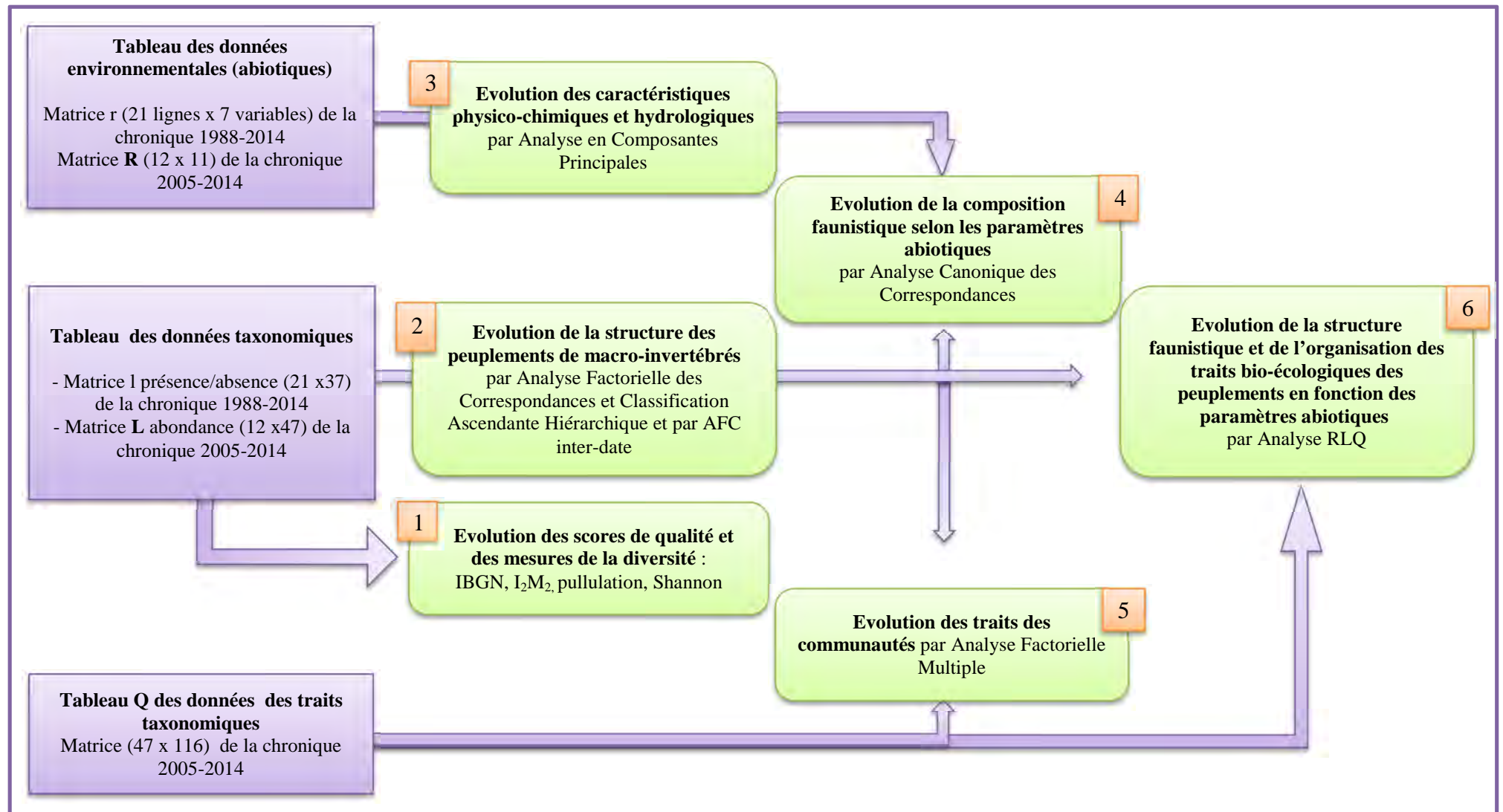


Figure 9 : Organigramme résumant la méthodologie de l'analyse des données

Ci-après est détaillée chaque analyse de la figure 9 :

1 Evolution des scores de qualité et des mesures de la diversité

La méthode d'analyse basée sur l'IBGN est précédemment développée au paragraphe 2.3 et celle basée sur l' I_2M_2 au paragraphe 2.4 du chapitre II Matériel et méthodes.

La méthode suivante renvoie à l'analyse exposée au 2.1.1 du chapitre III Résultats.

A partir de la matrice d'abondance L de la chronique 2005-2014 sont calculés les indices suivant :

L'indice de pullulation est un indice décroissant (moins les valeurs sont élevées plus le peuplement est équilibré). Il traduit le degré de dominance du taxon le plus représenté. $\sqrt{((n_j / N) \times (n_j / \bar{N}))}$ avec n_j l'effectif du taxon le plus abondant, N l'effectif total et \bar{N} la moyenne des effectifs.

L'indice de diversité de Shannon est lui un indice croissant qui prend en compte à la fois la richesse taxonomique et l'abondance relative de chaque taxon, il permet d'avoir une vision précise sur l'équilibre du peuplement.

$H'SHANNON = \sum (n_j / N) \ln(n_j / N)$ avec n_j l'effectif du taxon j et N l'effectif total.

2 Evolution de la structure des peuplements de macro-invertébrés

La méthode suivante renvoie aux analyses exposées au 1.2.1 et 2.2.1 du chapitre III Résultats.

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) s'applique soit à un tableau « l » binaire des présences/absences pour la chronique 1988-2014 soit au tableau « L » de contingence de la chronique 2005-2014. Les résultats sont exposés dans une représentation simultanée des lignes et des colonnes.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) sert à regrouper des individus (prélèvements) qui ont des caractéristiques communes. Elle sera effectuée en prenant en compte les 5 premières dimensions de l'analyse et sera construite avec la méthode de Ward.

La préparation de la matrice l présence/absence se fait comme suit :

- les listes génériques sont ramenées à la famille pour pouvoir les comparer,
- seules les phases A et B servant à calculer un équivalent IBGN sont utilisées,
- les taxons qui n'étaient pas recherchés avant 2005 sont écartés,
- pour avoir une analyse moins biaisée par les taxons rares, les taxons présents dans moins de 4 relevés sont écartés (*ceci ne posant que peu de problèmes, car leur présence ici ne révèle en rien une singularité temporelle de la rivière mais exprime plutôt le fait qu'un prélèvement n'est jamais exhaustif*).
- repérer les évolutions de systématiques.

La matrice L d'abondance des taxons (colonnes) pour chaque prélèvement (lignes) est le résultat de l'uniformisation des listes taxonomiques en :

- redistribuant les taxons déterminés au niveau de la famille (alors que la norme requiert un niveau générique pour le taxon considéré) au prorata des genres alors déterminés,
- regroupant certains genres, sources de confusion, au niveau de la famille,
- ne prenant pas en compte les taxons exceptionnels retrouvés dans seulement 1 ou 2 prélèvements.

En rajoutant en colonne à cette matrice une variable qualitative "saison" possédant 3 modalités (juillet, août, automne) une analyse factorielle des correspondances inter-date peut s'effectuer.

juillet	2005-07-05 2006-07-12 2007-06-26 2012-07-08 2013-07-10	Répartis sur 16 jours de 2005 à 2014
août	2009-08-12 2010-08-10 2011-08-03 2014-08-05	Répartis sur 9 jours de 2009 à 2014
automne	2005-09-27 2006-10-05 2008-11-19	Répartis sur 53 jours de 2005 à 2008

Cette AFCinter-date permet de savoir s'il existe ou non un impact de la date des prélèvements (saison) sur les compositions faunistiques en mettant l'accent sur les éventuelles différences et permet ainsi d'identifier les taxons responsables de cette différence.

Cette dernière méthode renvoie à l'analyse exposée au 2.2.2 du chapitre III Résultats.

3 Evolution des caractéristiques physico-chimiques et hydrologiques

La méthode suivante renvoie aux analyses exposées au 1.2.2 et 2.2.3 du chapitre III Résultats.

L'analyse en composantes principales (ACP) va permettre de faire un bilan des ressemblances entre prélèvements et réaliser la représentation dans un espace de dimension plus faible.

L'ACP sera centrée réduite car les unités de mesures des variables sont différentes.

La représentation des nuages de points permettra de visualiser facilement l'évolution globale.

Matrice r de la chronique 1988-2014

C'est un tableau avec des prélèvements en lignes (individus) et des paramètres abiotiques en colonnes (variables quantitatives) :

Température en °C, Oxygène dissous en mg/L, pH, conductivité à 25°C en µS/cm et nitrates en mg(NO₃/L). Malheureusement, seulement 4 à 6 mesures par année ont été prises pour ces paramètres. Seules les plus proches des dates de prélèvements sont sélectionnées pour l'analyse multidimensionnelle.

Ainsi que deux variables hydrologiques en m^3/s .

- le maximum des débits journalier moyen (QJM) des 60 jours précédant le prélèvement (il caractérise les hautes eaux des 2 derniers mois), pour identifier les effets des crues,
- le minimum des QJM des 60 jours précédant le prélèvement (attention : il augmente lorsque les basses eaux ont un débit important, il diminue lors de débits minimums faibles, il caractérise l'absence d'étiage marqué des deux derniers mois) pour identifier les effets des basses eaux (baisse de la dilution...).

Matrice R de la chronique 2005-2014

Reprend les mêmes variables avec 4 nouvelles variables hydrologiques m^3/s supplémentaires.

- le nombre de jours inférieurs au débit moyen mensuel sec de récurrence 2 ans (QMNA2 ou débit d'étiage biennal) durant l'année précédant le prélèvement. Le QMNA2 correspond au débit moyen mensuel minimum ayant une chance sur deux de ne pas être dépassé (ou 1 chance sur 2 d'être dépassé) une année donnée.

La valeur du QMNA2, calculée sur 50 ans, du Sorgomètre est de $6.5 m^3/s$.

Cet indice apporte une vision globale de l'année écoulée par rapport aux débits d'étiage. Plus la valeur augmente, plus les journées d'étiage ont été fréquentes.

- le nombre de jours inférieurs au débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (QMNA5 ou débit d'étiage quinquennal) durant l'année précédant le prélèvement. Le QMNA5 correspond au débit moyen mensuel minimum ayant une chance sur cinq de ne pas être dépassé (autrement dit 4 chances sur 5 d'être dépassé) une année donnée.

La valeur du QMNA5, calculée sur 50 ans, du Sorgomètre est de $4.9 m^3/s$.

Cet indice apporte une information similaire à la précédente mais par rapport à des valeurs d'étiages encore plus faibles.

- le nombre de jours supérieurs au module. Le module étant le débit moyen inter-annuel calculé ici sur 50 ans. Sa valeur est de $17.8 m^3/s$. Il permet de discriminer de façon globale (c'est une moyenne) les années sèches des années humides.

- le nombre de jours supérieurs au débit de crues d'occurrence biennale. Il correspond au débit journalier maximum ayant une chance sur 2 d'être dépassé. Sa valeur, calculée sur 50 ans, est de $51 m^3/s$.

Il caractérise les années subissant des crues communes (50% de chance qu'elles se produisent).

4 Evolution de la composition faunistique selon les paramètres abiotiques

La méthode suivante renvoie aux analyses exposées au 1.2.3 et 2.2.4 du chapitre III Résultats.

L'analyse canonique des correspondances (ACC) permet d'étudier les taxons de la matrice L (l) comme variables réponses aux variables explicatives la matrice R (r) des paramètres abiotiques. Les 12 (21) lignes des deux tableaux étant bien sûr identiques : ce sont les dates des prélèvements.

5 Evolution des traits des communautés

Cette analyse sera placée en annexe 6.

Une analyse permet d'étudier les peuplements à travers leurs traits, c'est l'analyse factorielle multiple AFM. Elle s'applique ici à un tableau obtenu à partir des tableaux L et Q. En lignes se trouvent les prélèvements et en colonnes les traits découpés en modalités.

Avec L le tableau des dénombrements des taxons.

Et Q est le tableau caractérisant les traits bio-écologiques (colonnes) de chaque taxon (lignes). Dans leur ouvrage *Invertébrés d'eau douce*, Henri Tachet *et al.* (2010) ont étudié les traits bio-écologiques des différents taxons d'invertébrés benthiques. Ces traits sont des variables (ex : taille, nombres de générations...) découpées en modalités (ex : le trait taille possède les modalités 2,5 à 5mm ; 5 à 10mm ; 10 à 20mm...). Henri Tachet propose un codage flou (coefficient) correspondant aux affinités du taxon pour les modalités (« 0 » indiquant une absence d'affinité, « 1 » une affinité faible, « 2 » une affinité moyenne et « 3 » ou « >3 » une forte affinité). Pour l'ensemble des taxons, une transformation du codage numérique des modalités est faite de façon à ce que le poids en terme d'information soit le même pour tous les taxons pour un trait donné ; c'est-à-dire que la somme des valeurs de codages des modalités d'un trait soit 1 pour tous les taxons, ce qui n'est pas le cas dans le « Tachet ».

L'obtention de ce tableau (à partir de L et Q) se fait par le calcul de la fréquence de chaque modalité est réalisé par la multiplication des abondances des taxons présents (*abondance réduite en log et elle-même pondérée suivant le groupe d'abondance du taxon, de façon à donner un peu plus de poids aux taxons naturellement peu abondants et qui sont souvent de bons indicateurs de l'état du milieu*) avec le coefficient pondéré des modalités de chaque trait. La somme des codages produits obtenus est effectuée pour chaque modalité et répartie en termes de fréquence pour chaque trait. Pour un prélèvement donné résulte la proportion d'affinité de chaque modalité.

6 Evolution de la structure faunistique et de l'organisation des traits bio-écologiques des peuplements en fonction des paramètres abiotiques

La méthode suivante renvoie à l'analyse exposée au 2.2.5 du chapitre III Résultats.

L'analyse RLQ permet d'identifier d'éventuelles réponses des traits (des invertébrés constituant un prélèvement) aux fluctuations des variables environnementales. Comme son nom l'indique, elle fait intervenir les 3 tableaux R, L et Q.

L est le tableau des dénombrements des taxons (en colonnes) lors des prélèvements (en lignes). Le passage en log de la matrice L permet ici de limiter l'impact des traits du taxon 892 (*Gammarus*) qui a des effectifs trop importants.

R est le tableau des données environnementales (en colonnes) pour chaque prélèvement (en lignes).

Q est le tableau caractérisant les traits bio-écologiques (colonnes) de chaque taxon (lignes).

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Analyse de la chronique 1988-2014

1.1 L'Indice Biologique Global Normalisé

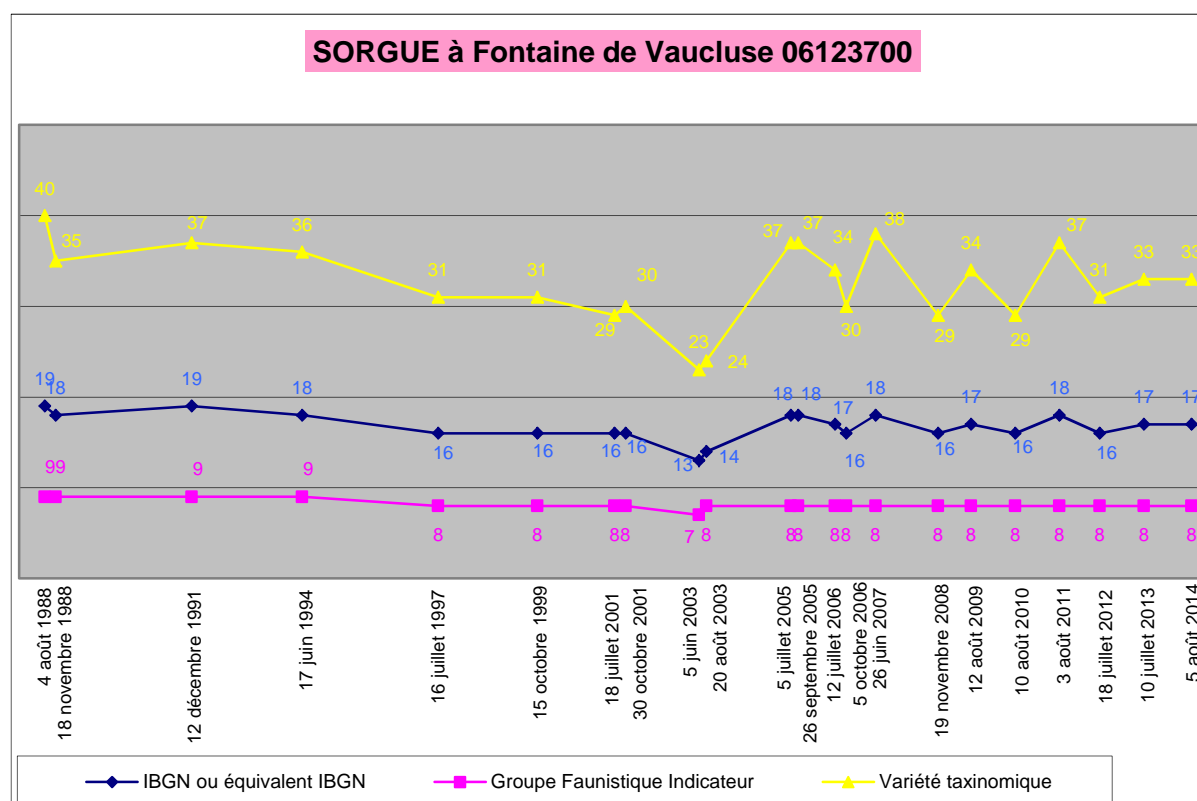


Figure 10 : Graphique de l'évolution de l'IBGN et ses composantes pour la station de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse de 1988 à 2014

La figure 10 décrit l'évolution de l'IBGN en bleu et de ses composantes : groupe faunistique indicateur (GFI) en rose et variété taxinomique en jaune. Hormis en 2003, tous les prélèvements sont classés en très bon état pour le paramètre (≥ 16). En effet, ces prélèvements de 2003 semblent être atypiques par leur faible diversité taxinomique ou par leur GFI.

La principale information qui ressort est la perte d'un point dans le groupe faunistique indicateur due à la disparition dans les prélèvements, du genre *Dinocras* (Perlidae)⁸, au milieu des années 1990.

⁸ Annexe 5

1.2 Caractérisation des prélèvements à partir des présences et absences

Pour comprendre et expliquer les différences entre les prélèvements, 21 listes ont été étudiées (la liste du 16/07/1997 étant manquante).

Le tableau III permet de porter un premier regard, d'un côté sur les communautés fréquemment rencontrées et d'un autre, sur celles rarement présentes dans les prélèvements.

Tableau III : Fréquence d'apparition des taxons dans les 21 prélèvements de 1988 à 2014

Présence sur 21 prélèvements	Taxons
21	Odontoceridae, Rhyacophilidae, Baetidae, Elmidae, Chironomidae, Gammaridae, Hydrobiidae, Planariidae, Oligochete, Hydracariens
20	Neritidae
19	Glossosomatidae, Heptageniidae, Simuliidae
18	Leuctridae, Ephemerellidae, Lymnaeidae, Glossiphoniidae
17	Limnephilidae, Ancyliidae, Piscicolidae
16	Goeridae, Psychomyidae, Sericostomatidae, Planorbidae, Valvatidae
15	Empididae
13	Asellidae, Erpobdellidae, Sphaeriidae
12	Dendrocoelidae
10	Polycentropodidae, Ephemeridae
9	Hydroptilidae,
8	Lepidostomatidae, Nematelminthes
7	Limoniidae, Psychodidae
6	Leptoceridae
5	Leptophlebiidae, Anthomyidae, Emmericiidae
4	Perlidae, Hydropsychidae, Scirtidae, Ceratopogonidae, Dugesidae
3	Calopterygidae, Physidae
2	Caenidae, Veliidae, Dryopidae, Tabanidae, Tipulidae, Cordulegasteridae
1	Gyrinidae, Hydraenidae, Hydrophilidae, Dixidae, Stratiomyidae, Pyralidae

Les présences sporadiques ou irrégulières dans le temps peuvent être expliquées par :

- la disparition du taxon (espèces polluosensibles)
- l'apparition du taxon (espèces allochtones, colonisation...)
- la variabilité temporelle (saison du prélèvement non propice, phase embryonnaire...)
- la variabilité spatiale (choix de la placette du micro-prélèvement par l'opérateur)
- le jeu des variations des plans d'échantillonnages
- le micro-prélèvement dans un habitat marginal (semi-aquatique, substrat rare)
- la faible densité des taxons (sommet de la chaîne trophique, taxons rares en limite de répartition géographique)
- le fait que le prélèvement ne soit pas exhaustif et donc que des taxons présents soient ignorés.

1.2.1 Evolution de la structure des peuplements

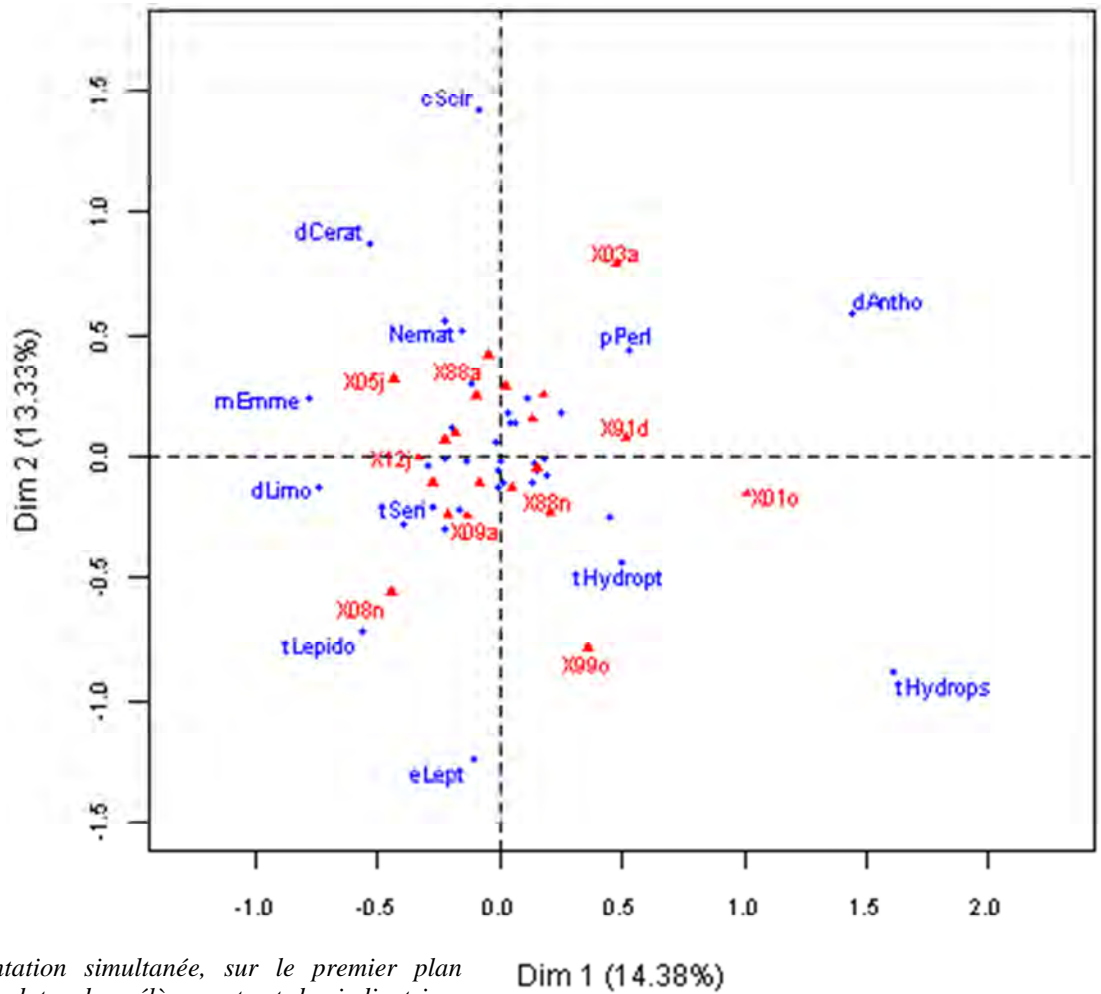


Figure 11 : Représentation simultanée, sur le premier plan principal de l'AFC, des dates de prélèvements et des indicatrices des taxons les plus contributifs et les mieux représentés

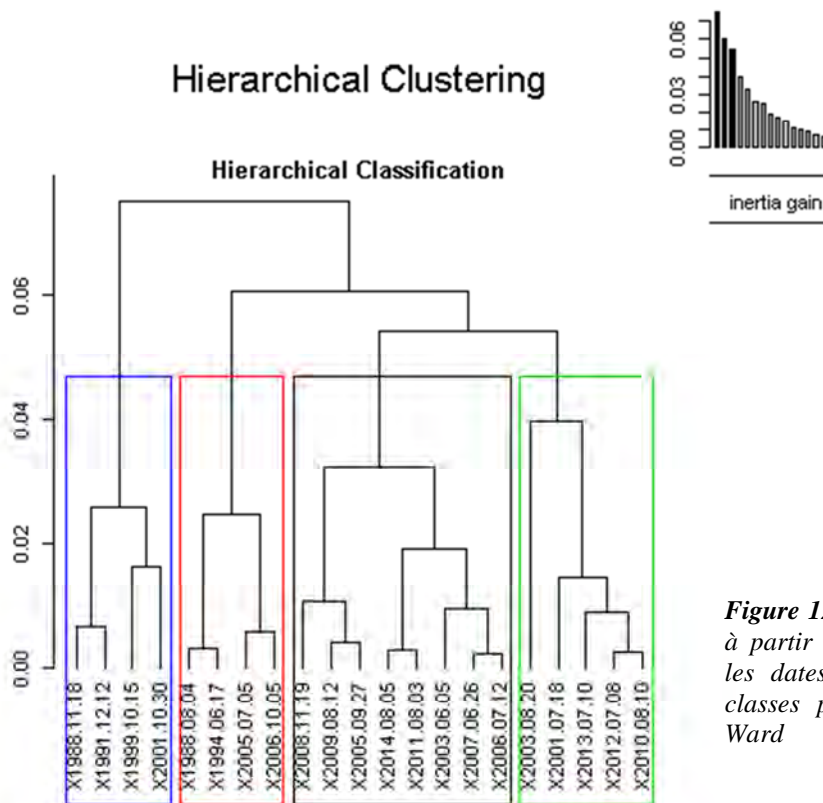


Figure 12 : Dendrogramme de la CAH réalisée à partir des résultats de l'AFC, représentant les dates de prélèvements regroupées en 4 classes principales grâce à la méthode de Ward

Tableau IV : Prélèvements et taxons les plus contributifs à l'axe 1 de l'AFC

Prélèvements	Contribution (%)	Cos ²	Coordonnées	Taxons	Contribution (%)	Cos ²	Coordonnées
2001.10.30	35.1	0.69	+	Hydropsychidae	22.4	0.56	+
1991.12.12	13.6	0.39	+	Anthomyidae	22.3	0.49	+
2005.07.05	10.7	0.31	-	Limoniidae	08.3	0.26	-
2008.11.19	08.0	0.20	-	Emmericidae	06.6	0.22	-

Tableau V : Prélèvements et taxons les plus contributifs à l'axe 2 de l'AFC

Prélèvements	Contribution (%)	Cos ²	Coord	Taxons	Contribution (%)	Cos ²	Coord
1999.10.15	25.7	0.49	-	Scirtidae	18.7	0.44	+
2003.08.20	18.9	0.34	+	Leptophlebiidae	17.9	0.49	-
2008.11.19	13.9	0.32	-	Lepidostomatidae	09.5	0.31	-
1988.08.04	11.3	0.33	+	Hydropsychidae	07.2	0.17	-
				Ceratopogonidae	07.1	0.23	+

Au regard des résultats de la figure 11, une césure existe entre les prélèvements anciens jusqu'à 2003 (à droite) et les récents (à gauche).

L'axe 1 renseigne donc sur une évolution globale : certains taxons disparaissent des listes et d'autres apparaissent au fil du temps.

Disparitions :

Le dernier prélèvement d'Hydropsychidae a eu lieu en octobre 2001 et celui d'Anthomyidae en juillet 2006 mais avant cela en août 2003.

Les Perlidae, positionnés à droite de cet axe, ne sont plus retrouvés depuis 1994.

Apparitions :

Alors qu'il est fréquent dans 1 prélèvement sur 2 depuis 2005, Limoniidae n'avait été trouvé avant cela qu'en juillet 2001.

Emmericidae est lui constamment retrouvé depuis 2011 mais n'avait été déterminé précédemment qu'en juillet 2005.

Lepidostomatidae, qui, avant 2005, n'avait été prélevé qu'une fois en 1999, se retrouve quasi systématiquement depuis 2008.

Les ressemblances entre les prélèvements sont traduites dans la figure 12.

Les prélèvements de novembre 1988, décembre 1991, octobre 1999 et octobre 2001 sont regroupés entre eux et éloignés des autres exprimant éventuellement une particularité automnale.

Une évolution temporelle apparaît clairement dans ces résultats ainsi qu'un possible effet de saisonnalité.

1.2.2 Evolution des paramètres hydrologiques et physico-chimiques

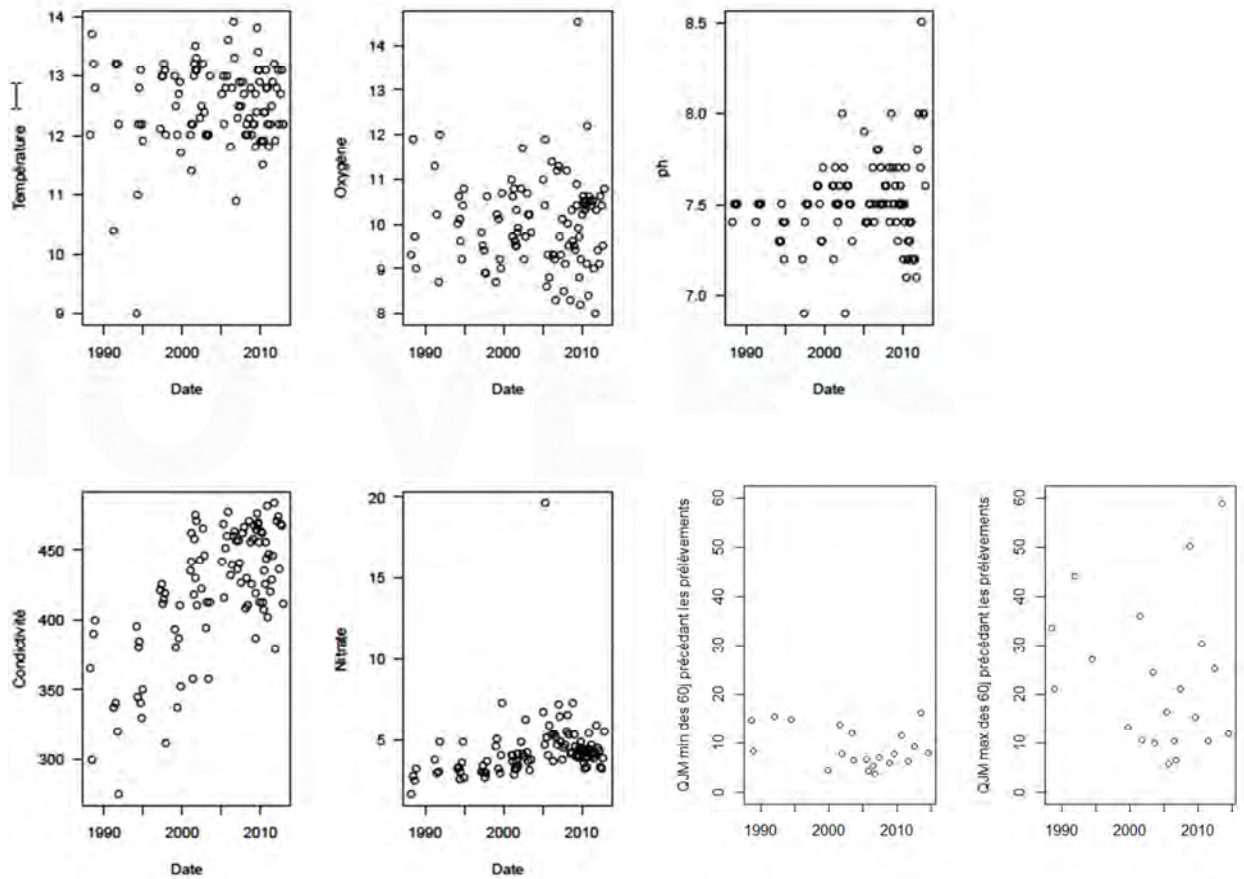


Figure 13 : Nuage de points de tous les relevés existants des paramètres abiotiques en fonction du temps : température (°C), oxygène dissous (mg/L), pH, conductivité à 25°C (µS/cm), nitrates (mg(NO₃)/L), le minimum des débits journaliers moyens (QJM) des 60 jours précédant le prélèvement

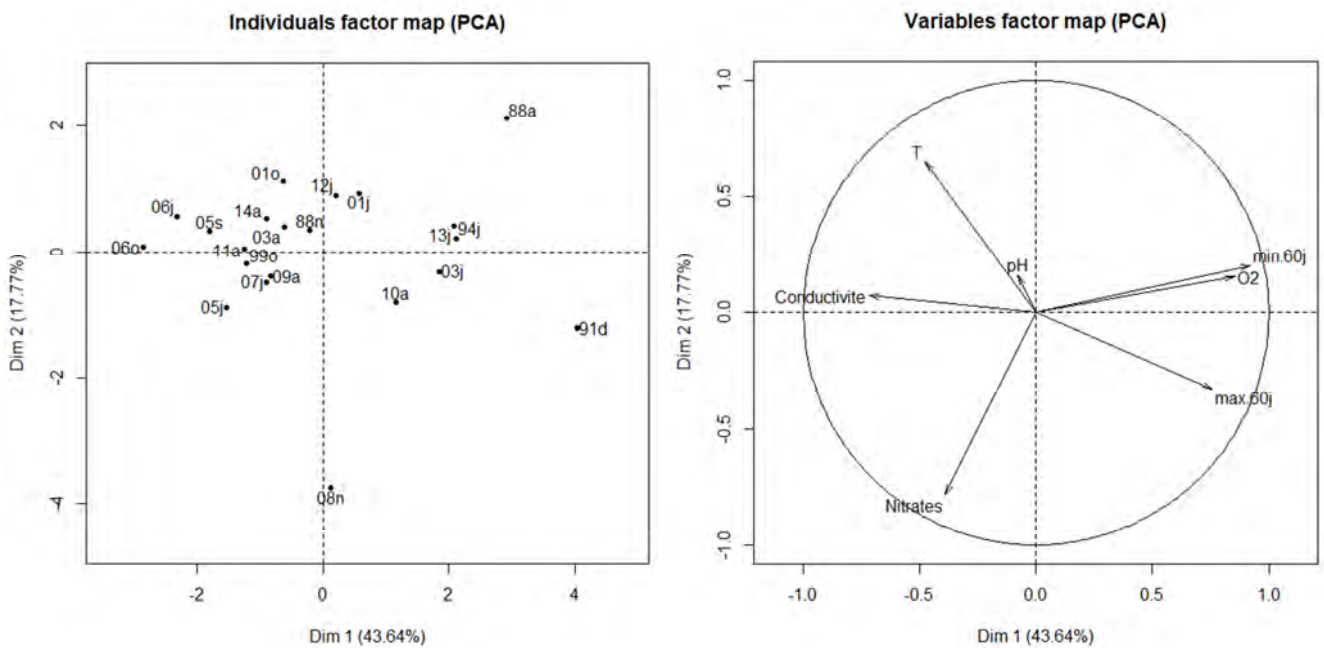


Figure 14 : Nuage des dates de prélèvements et cercle des corrélations des variables abiotiques du premier plan principal de l'ACP

Tableau VI : Prélèvements et paramètres les plus contributifs à l'axe 1 de l'ACP

Prélèvements	Contribution (%)	Cos ²	Coordonnées	Paramètres	Contribution (%)	Cos ²	Coordonnées
1991.12.12	25.5	0.79	+	min.60j	27.7	0.85	+
1988.08.04	13.3	0.47	+	O ₂	24.0	0.73	+
2006.10.05	12.7	0.72	-	max.60j	18.8	0.57	+
2006.07.12	08.4	0.61	-	Conductivité	16.9	0.52	-

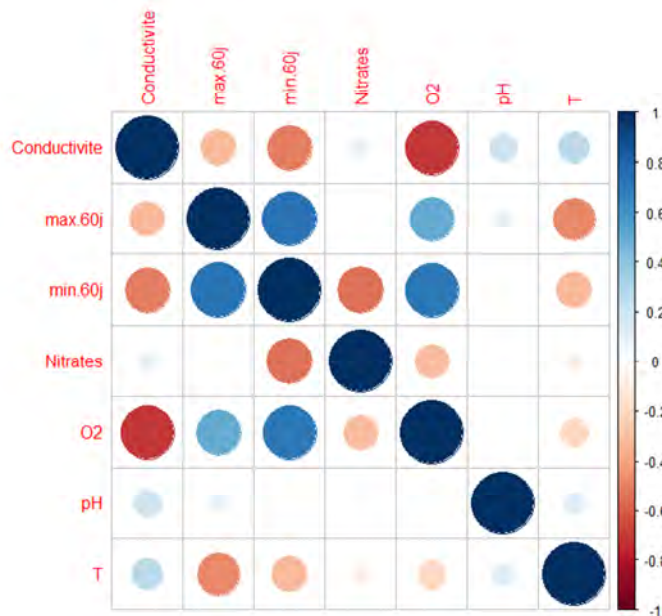


Figure 15 : Graphique des corrélations de Pearson entre les variables abiotiques

Les paramètres physico-chimiques et hydrologiques qui pourraient fournir une explication aux listes de présences taxonomiques sont présentés en figure 13.

Les valeurs des mesures de conductivité et de nitrates augmentent dans le temps.

La majorité des relevés de température se trouvent entre 11 et 14°C, montrant une faible amplitude expliquée par la spécificité de l'exsurgence karstique.

Les prélèvements autour de 2006 semblent avoir été réalisés durant des périodes d'étiages relativement importants.

Les autres variables sont, au premier regard, plus difficilement interprétables.

L'étude multidimensionnelle de ces diverses variables abiotiques (mesurées pour chaque prélèvement) est représentée en figure 14. Le premier plan principal de l'ACP explique 61,4% de l'inertie totale. L'axe 1 oppose les années à forte conductivité 2006 et 2005 aux années où les prélèvements ont été réalisées suite à des périodes plus humides avec des eaux plus oxygénées (1991, 1988...).

Les 2 paramètres de débits ont logiquement de fortes corrélations linéaires (figure 15).

L'O₂ est directement influencé par les débits et notamment le min60j : moins les eaux sont basses, plus il y a de dioxygène dissous. A l'opposé, plus il y a de conductivité, moins il y a d'O₂. Les autres paramètres apparaissent ici peu parlants hormis peut-être les nitrates qui augmentent lors des basses eaux.

La température de la Sorgue amont ayant une faible amplitude annuelle, ce paramètre semble moins corrélé avec les autres variables abiotiques. En fin, le pH semble stable avec toutefois une amplitude croissante, dans le temps, des valeurs relevées.

1.3 Discussion des résultats de l'analyse de la chronique 1988-2014

Jusqu'en 2000, le protocole Indice Biotique était appliqué par la Direction de l'Environnement de PACA qui a ensuite utilisé l'IBGN. A partir de 2005, l'utilisation du protocole à 12 micro-prélèvements s'est généralisée. Il faut donc être prudent sur les résultats de l'IBGN, notamment avec la variété taxonomique.

La disparition des Perlidae⁹, taxon le plus polluo-sensible, est cependant une donnée plus fiable. Elle est concomitante avec l'augmentation de la conductivité. Cette dernière pourrait provenir d'un changement de pratique sur l'impluvium de la Sorgue. En effet, une augmentation de plus 20% entre 1990 et 2000 ne pourrait s'expliquer par le seul phénomène de karstification (Blondel, 2008). Ce supposé changement de pratique, outre l'augmentation de la conductivité, a pu introduire des polluants chimiques (peu ou pas recherchés par les analyses) devenant des facteurs létaux pour l'espèce *Dinocras cephalotes* (Frutiger, 1987 ; Favrel, 1998). Par ailleurs, malgré le potentiel de dispersion de l'espèce *Dinocras cephalotes* (Elbrecht 2013), l'éloignement géographique des populations avoisinantes est un facteur limitant pour la recolonisation de ce milieu.

A l'opposé, l'apparition récente des Limoniidae dans les années 2000, où la conductivité moyenne est de l'ordre de 450 $\mu\text{s}/\text{cm}$, peut s'expliquer par le caractère ubiquiste de ce taxon. Effectivement, cette famille peut profiter des crues pour s'implanter (El Imrani 2012). La crue de décembre 2003 (débit de 81.40 m^3/s atteint le 21/12/2003) a pu lui être bénéfique.

Enfin, le cas de la famille de Gastéropode Emmericidae est assez particulier. *Emmericia patula* (Brumati) est une espèce allochtone présente en France dans 3 cours d'eau karstiques (Siagne, Loup et Sorgue). Rajoutée à la faune de France en 1986 par Mouthon, son apparition tardive dans les listes est peut-être liée à son manque de description dans les ouvrages de détermination.

Cette première analyse globale montre les difficultés d'étudier une série temporelle formée à partir de protocoles différents. Effectivement, le lot d'incertitudes intervenant est important :

- incertitude inter-méthode
- incertitude intra-méthode (effets opérateurs, effets saisonnalités)
- incertitude due au niveau taxonomique trop imprécis : famille
- biais amenés par les taxons rares lors des méthodes d'ordinations (AFC, ACC).

De plus, le manque de données sur les paramètres potentiellement explicatifs incite à ne pas faire de liens hâtifs. Par exemple, les données ponctuelles d' O_2 sont difficilement interprétables car fortement corrélées à la photosynthèse des végétaux aquatiques.

Un doute existe sur la fiabilité de la donnée en nitrate du prélèvement de novembre 2008 (figure 13).

Par la suite, pour des raisons d'homogénéité des données, seule la série chronologique restreinte de 2005 à 2014 sera approfondie. En effet, depuis 2005 une même méthode est appliquée permettant d'interpréter des listes produites à un niveau générique et ce sur 12 micro-prélèvements.

L'apport des traits bio-écologiques et des dénombrements des taxons permettra d'affiner l'analyse.

⁹ Note « Focus sur les Perlidae » en annexe 5

2. Analyse de la chronique 2005-2014

2.1 Evolution des scores de qualité et des mesures de la diversité

2.1.1 Indices de diversité

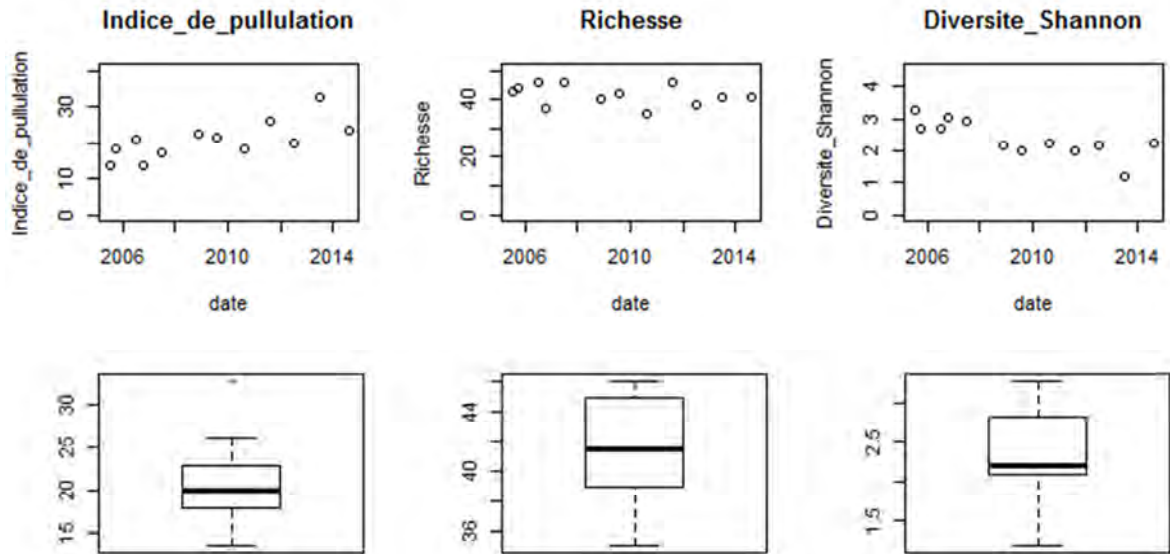


Figure 17 : Graphique de l'ensemble des nuages de points de chaque indice calculés sur la somme des 12 prélèvements unitaires et leurs dispersions

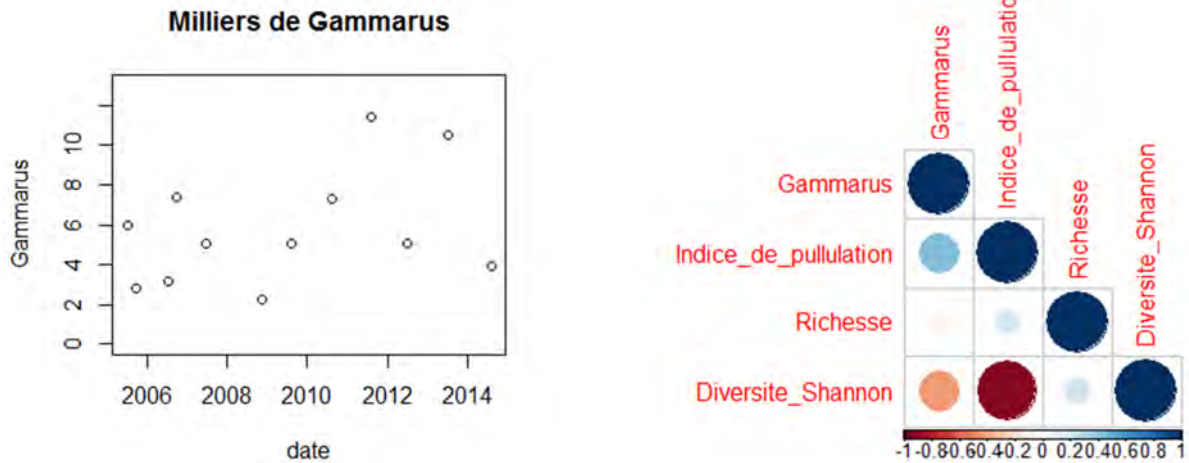


Figure 18 : Effectifs en milliers du genre Gammarus en milliers d'individus

Figure 19 : Graphique des corrélations des indices de diversité

Une nette hausse de l'indice de pullulation est visible correspondant à la baisse de l'indice de Shannon. Cette baisse est principalement liée à la dominance du taxon *Gammarus*.

La richesse taxonomique, quant à elle, reste relativement constante au fil des années dans une fourchette allant de 35 à 46 taxons et impacte peu l'indice de Shannon.

2.1.2 Indice Invertébrés Multi-Métriques (I_2M_2)**Tableau VII** : Valeurs des métriques de l' I_2M_2 pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005

Date	Shannon (B1B2)	ASPT (B2B3)	Polyvoltinism (B1B2B3)	Ovoviviparity (B1B2B3)	Richness (B1B2B3)
05/07/2005	2,77	5,79	0,27	0,17	44
27/09/2005	2,14	5,27	0,27	0,17	44
12/07/2006	2,34	5,62	0,26	0,17	45
05/10/2006	2,85	5,50	0,26	0,17	37
26/06/2007	2,93	5,73	0,30	0,20	44
19/11/2008	2,31	5,78	0,27	0,20	41
12/08/2009	2,51	6,07	0,29	0,16	42
10/08/2010	2,38	6,23	0,30	0,14	35
03/08/2011	2,14	5,85	0,26	0,10	48
08/07/2012	1,94	6,07	0,28	0,11	39
10/07/2013	1,52	6,15	0,28	0,13	43
05/08/2014	2,24	6,10	0,26	0,13	41

Tableau VIII : Valeurs des métriques en EQR et I_2M_2 qui en découle (en vert) pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005

Date	EQR Shannon (B1B2)	EQR ASPT (B2B3)	EQR Polyvoltinism (B1B2B3)	EQR Ovoviviparity (B1B2B3)	EQR Richness (B1B2B3)	I_2M_2
05/07/2005	0,56	0,58	0,86	0,47	0,60	0,6180
27/09/2005	0,26	0,35	0,87	0,47	0,60	0,5207
12/07/2006	0,36	0,50	0,92	0,47	0,62	0,5888
05/10/2006	0,60	0,45	0,90	0,46	0,41	0,5739
26/06/2007	0,64	0,55	0,71	0,37	0,60	0,5671
19/11/2008	0,35	0,57	0,87	0,35	0,52	0,5469
12/08/2009	0,44	0,70	0,75	0,50	0,54	0,6009
10/08/2010	0,38	0,77	0,71	0,57	0,36	0,5863
03/08/2011	0,26	0,60	0,93	0,72	0,70	0,6675
08/07/2012	0,17	0,70	0,81	0,69	0,46	0,6059
10/07/2013	0,00	0,73	0,81	0,63	0,57	0,5890
05/08/2014	0,31	0,71	0,91	0,62	0,52	0,6450

Tableau IX : Limites inférieures des classes d'état pour le type CEMAGREF MP6

Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
0.6916	0.4362	0.2908	0.1454	0

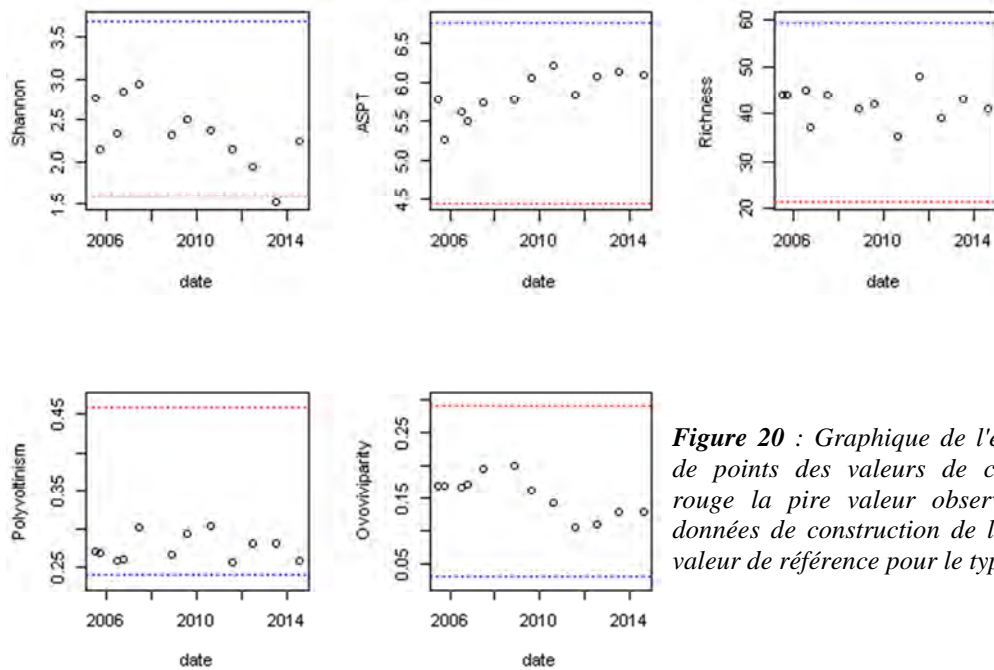


Figure 20 : Graphique de l'ensemble des nuages de points des valeurs de chaque métrique, en rouge la pire valeur observée dans le jeu de données de construction de l'indice et en bleu la valeur de référence pour le type CEMAGREF MP6

Valeurs de l' I_2M_2 de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse

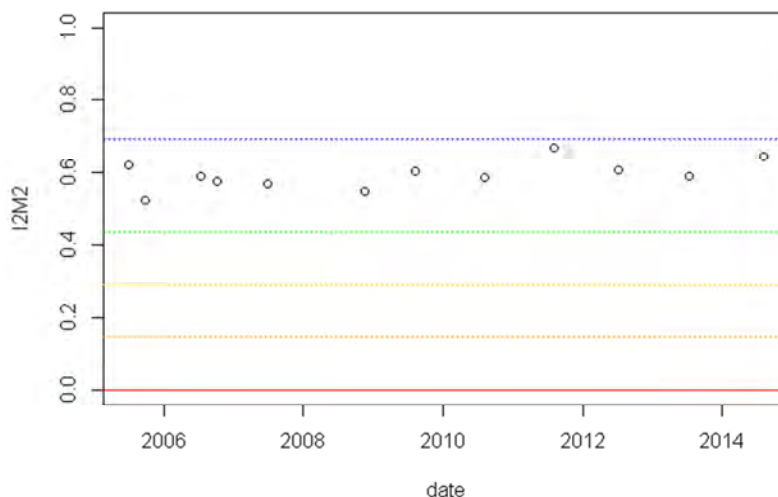


Figure 21 : Graphique des valeurs d' I_2M_2 pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005 et délimitations des limites de classe d'état pour le paramètre invertébrés en type CEMAGREF MP6

Malgré la baisse de l'indice de Shannon, l'ASPT (en hausse) et la fréquence relative des espèces ovovivipares (en baisse) indiquent une amélioration de la qualité des peuplements d'invertébrés après 2009.

La définition des classes d'état permet ici de dire que la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 est à première vue une station en bon état du point de vue de l'indice invertébrés, resté relativement constant de 2005 à 2014.

2.1.3 Outil diagnostique de l'I₂M₂**Tableau X** : Probabilités d'altérations de la qualité de l'eau pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005

	Matière organique WQ1	Composés azotés WQ2	Nitrates WQ3	Composés phosphorés WQ4	Acidification WQ6	Pesticides WQ8
2005-07-05	0,410	0,284	0,776	0,500	0,501	0,390
2005-09-27	0,511	0,411	0,765	0,504	0,503	0,353
2006-07-12	0,510	0,389	0,726	0,501	0,501	0,289
2006-10-05	0,516	0,429	0,790	0,507	0,501	0,487
2007-06-26	0,506	0,361	0,782	0,501	0,501	0,418
2008-11-19	0,515	0,468	0,698	0,504	0,527	0,358
2009-08-12	0,319	0,307	0,480	0,380	0,484	0,220
2010-08-10	0,301	0,309	0,413	0,320	0,512	0,122
2011-08-03	0,255	0,206	0,497	0,346	0,232	0,193
2012-07-08	0,313	0,216	0,491	0,217	0,501	0,171
2013-07-10	0,317	0,263	0,404	0,480	0,514	0,297
2014-08-05	0,332	0,266	0,540	0,209	0,419	0,166

Tableau XI : Probabilités d'altérations sur la qualité de l'habitat pour chaque prélèvement de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005

	Voies de communications HD1	Ripisylve HD2	Urbanisation HD3	Risque de colmatage HD4	Instabilité hydrologique HD5
2005-07-05	0,286	0,485	0,654	0,623	0,515
2005-09-27	0,308	0,440	0,645	0,544	0,500
2006-07-12	0,345	0,455	0,663	0,562	0,492
2006-10-05	0,332	0,527	0,664	0,622	0,512
2007-06-26	0,458	0,444	0,651	0,636	0,493
2008-11-19	0,333	0,466	0,663	0,582	0,585
2009-08-12	0,504	0,398	0,619	0,408	0,519
2010-08-10	0,512	0,377	0,568	0,213	0,511
2011-08-03	0,429	0,417	0,622	0,369	0,557
2012-07-08	0,501	0,396	0,584	0,332	0,553
2013-07-10	0,506	0,377	0,606	0,378	0,635
2014-08-05	0,503	0,443	0,612	0,373	0,518

Cet outil diagnostique est une aide à l'interprétation de l'I₂M₂.

Il révèle, en tableau X, la possibilité que les pressions sur la qualité de l'eau (WQ) aient eu tendance à s'estomper à partir de 2009. Par ailleurs, il indique, en tableau XI, que « l'urbanisation dans un rayon de 100m » pourrait avoir un impact négatif sur les communautés d'invertébrés.

2.2 Caractérisation des prélèvements à partir des effectifs

2.2.1 Evolution de la structure des peuplements

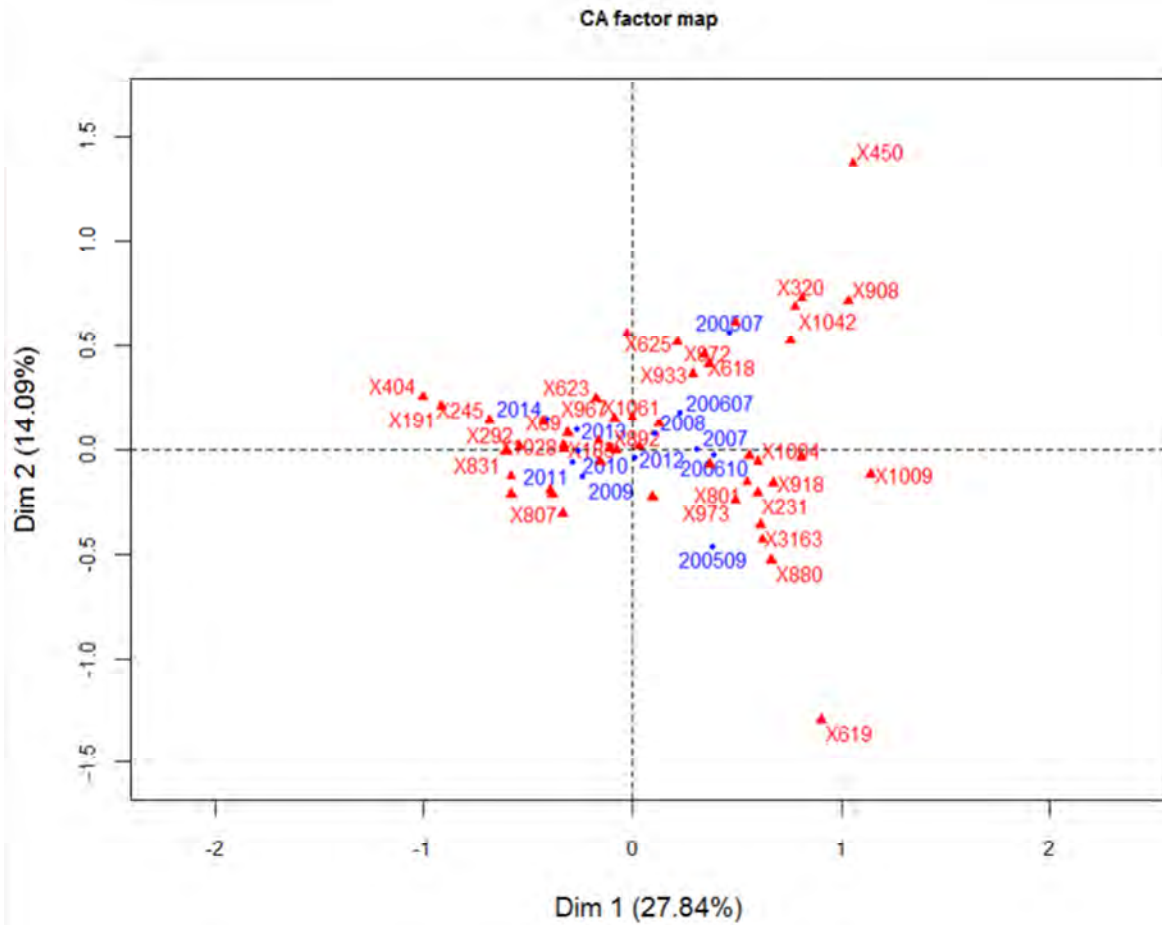


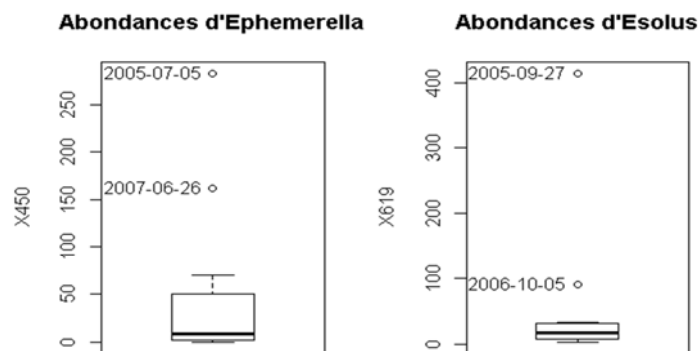
Figure 22 : Représentation simultanée, sur le premier plan principal de l'AFC, des dates de prélèvements et des taxons les plus contributifs et les mieux représentés

Tableau XII : Prélèvements et taxons les plus contributifs à l'axe 1 de l'AFC

Taxons	Code Sandre	Contribution	Coordonnées	Prélèvements	Contribution	Coordonnées
Hydrobiidae	973	20,1827	+	200509	15,8389	+
Planorbidae	1009	14,3782	+	2011	13,8023	-
Simuliidae	801	10,6084	+	200507	13,3851	+
Gammarus	892	8,8038	-	2014	9,8276	-
Ephemerella	450	6,7728	+	2007	9,6162	+
Chironomidae	807	5,9571	-	200610	9,1897	+
Esolus	619	5,7185	+	2013	8,9805	-
Agapetus	191	5,7153	-	2010	7,6561	-
Glossiphoniidae	908	4,7408	+	200607	6,5138	+
Rhithrogena	404	3,225	-	2009	4,8097	-

Tableau XIII : Effectifs des principaux taxons marquant une évolution

	404	191	245	292	1009	908	619	1042
200507	2	0	3	2	150	97	16	23
200509	4	3	2	6	305	25	415	6
200607	1	3	0	4	199	142	7	14
200610	0	5	1	5	181	69	91	8
2007	3	0	0	1	189	73	3	14
2008	2	15	0	9	28	2	28	11
2009	22	13	17	13	1	8	7	7
2010	61	246	22	28	1	0	33	0
2011	38	45	21	19	4	6	30	0
2012	6	46	62	10	4	0	19	1
2013	34	71	59	1	7	6	16	0
2014	136	214	48	30	0	1	10	6

**Figure 23** : Dispersion des effectifs des taxons *Ephemerella* 450 et *Esolus* 619 montrant des valeurs extrêmes

L'axe 1 de la figure 22 (27,84% d'inertie) met globalement en lumière des changements importants des abondances relatives de certains taxons.

Il ressort, d'un côté (gauche de la figure 22), une augmentation, depuis 2009, des insectes à phase adulte aérienne (*Rhetrogena* 404, *Agapetus* 191, *Tinodes* 245, *Silo* 292) et d'un autre côté (droite de la figure 22), une diminution depuis 2009, de taxons à phase adulte aquatique (*Planorbiidae* 1009, *Glossiphoniidae* 908, *Esolus* 619, *Sphaeriidae* 1042).

Deux groupes de prélèvements se différencient donc par leurs structures, ceux réalisés durant la période 2005-2008 et ceux réalisés durant la période 2009-2014.

L'utilisation des traits écologiques permettra de caractériser cette évolution temporelle des peuplements (évolution inter-années).

L'axe 2 (14,09% d'inertie) est un axe montrant notamment les explosions d'abondances d'un taxon donné sur quelques prélèvements.

Ephemerella 450 lors des prélèvements estivaux du 05/07/2005 et du 26/06/2007 en haut de la figure 22.

Esolus 619 lors des prélèvements automnaux du 27/09/2005 et du 05/10/2006 en bas de la figure 22.

2.2.2 Effet de saisonnalité

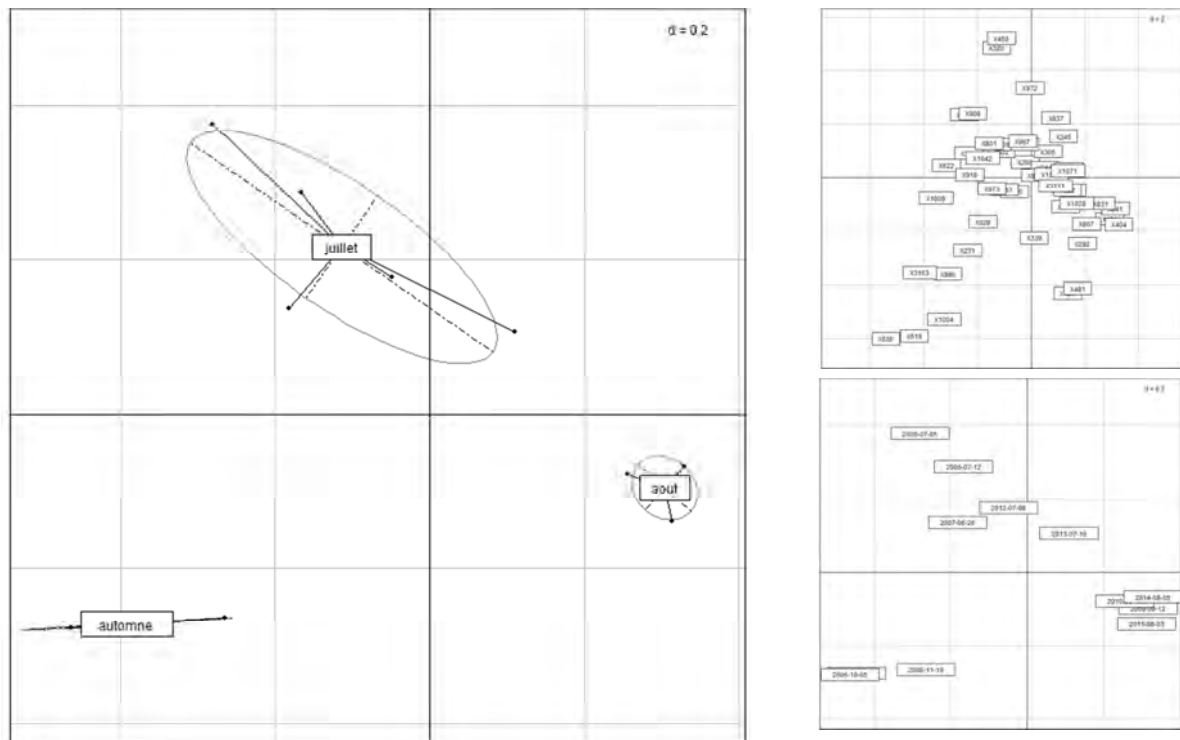


Figure 24 : Représentation, sur le premier plan principal de l'AFC inter-saison, des barycentres des périodes de prélèvements (à gauche), des taxons (en haut à droite) et des prélèvements (en bas à droite).

Les ellipses de la figure 24 sont bien distinctes attestant des spécificités taxonomiques de chaque saison.

Les prélèvements tardifs en automne s'éloignent notamment de ceux effectués en août et en juillet.

Le premier axe oppose sans conteste les prélèvements d'automne à ceux d'août. A la lecture des contributions des taxons, cette différence est en tous points semblable à celle entrevue au paragraphe précédent (2.2.1).

Cela est principalement dû au fait que les prélèvements automnaux ont été effectués seulement durant la période de 2005 à 2008 et les prélèvements d'août seulement durant la période 2009-2014. C'est alors plus l'effet interannuel qui est mis en lumière plutôt que l'effet de saisonnalité.

L'analyse des facteurs abiotiques permettra d'identifier les spécificités propres à chacune de ces deux périodes bien distinctes.

2.2.3 Evolution des paramètres hydrologiques et physico-chimiques

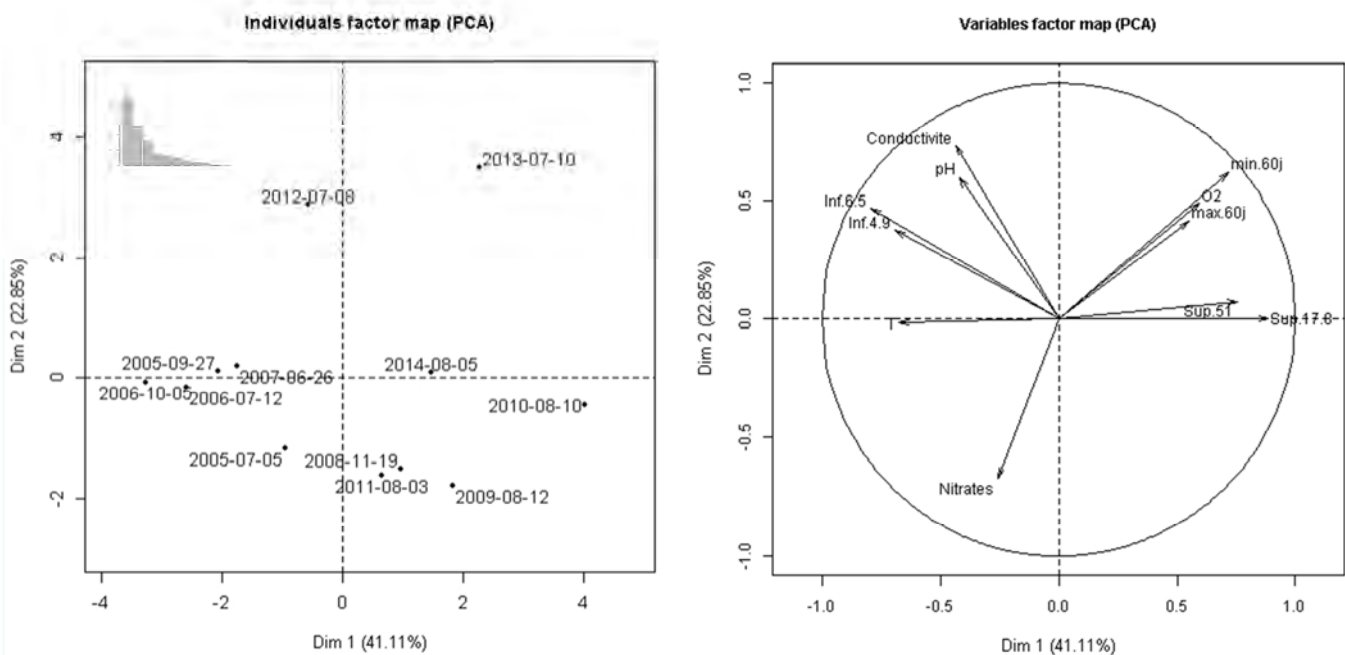


Figure 25 : Nuage des dates de prélèvements de 2005-2014 et cercle des corrélations des variables abiotiques du premier plan principal de l'ACP expliquant 64% de l'inertie totale

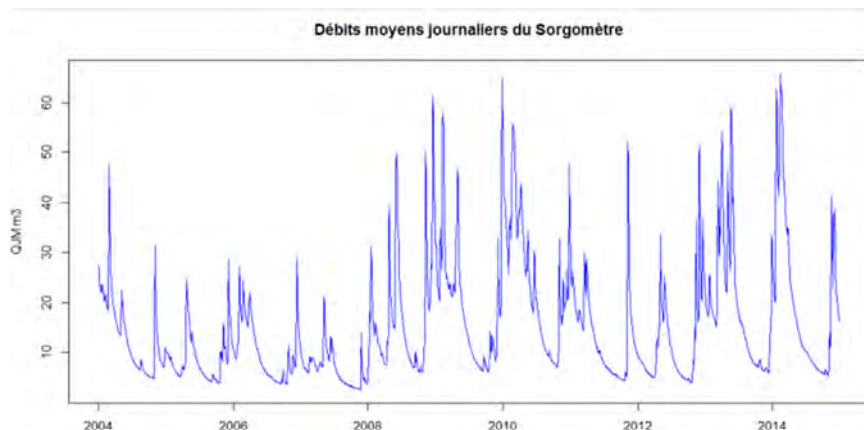


Figure 26 : Graphique des débits journaliers moyens du Sorgomètre de 2004 à 2014

L'axe 1 de la figure 25 discrimine les prélèvements en fonction de leurs conditions hydrologiques de l'année. Les prélèvements qui ont été réalisés durant une année hydrologique sèche se retrouvent sur la gauche tandis que ceux ayant subi des débits plus importants au cours de l'année se retrouvent à droite du graphique. Les années 2005, 2006 et 2007 peuvent ainsi être considérées comme années particulièrement sèches.

Le prélèvement de juillet 2012 a été effectué suite à une année durant laquelle les étiages ont été marqués.

Les prélèvements d'août 2009 et 2010 ont été précédés d'une période particulièrement humide tout comme celui de 2014 qui fait suite à une année qui a comporté une période de 26 jours de débit supérieur à 51 m³/s.

Le prélèvement de 2013 se distingue pour avoir été fait au cours d'une année qui a présenté à la fois des étiages marqués et des crues.

La conductivité, les nitrates, le débit minimum des 60 derniers jours puis le pH contribuent principalement à la formation de l'axe 2.

2.2.5 Evolution de la structure faunistique et de l'organisation des traits bio-écologiques des peuplements en fonction des paramètres abiotiques

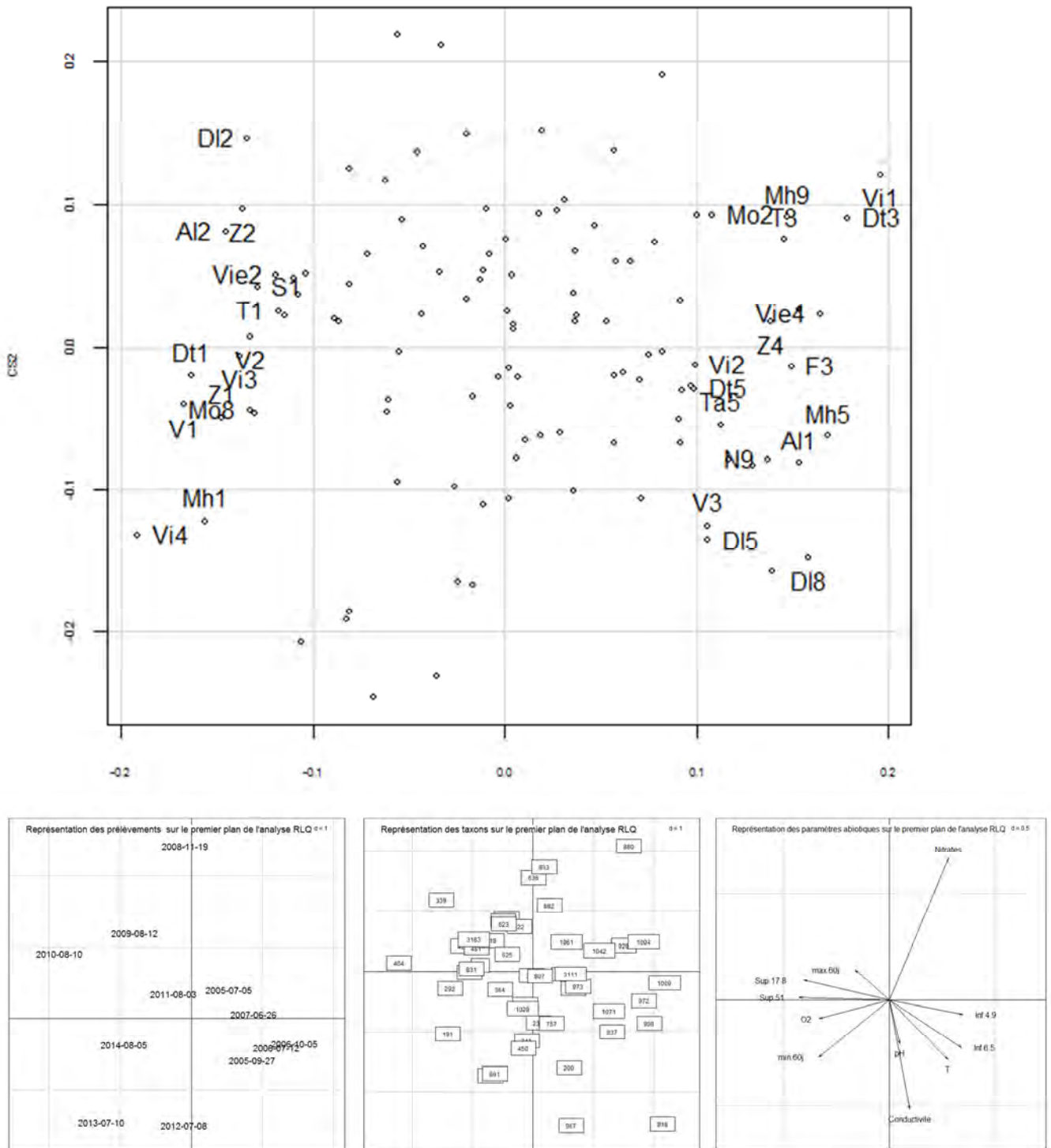


Figure 28 : Représentation sur le premier plan principal de l'analyse RLQ des modalités des « variables traits » (en haut), des prélèvements (en bas à gauche), des taxons (en bas au milieu) et des variables abiotiques (en bas à droite)

Cette analyse RLQ permet d'expliquer l'impact des variables abiotiques et notamment l'hydrologie sur les communautés d'invertébrés en mettant en lumière les différences de traits.

La période sèche 2005-2007 est caractérisée par des taxons (Radix 1004, Planorbidae 1009, Piscicolidae 918, Aselidae 880, Valvata 972, Glossiphonidae 908) dont les traits¹¹ révèlent le caractère perturbé de la Sorgue amont à cette période :

- Vitesse : eau nul Vi1
- Distribution transversale : étangs mares méandres abandonnés Dt3
- Microhabitats *preferendum* : macrophytes algues filamenteuses Mh5
- Vie aquatique : adulte Vie4
- Distribution longitudinale : hors hydrosystème fluvial DI8
- ...

A l'inverse, la période moins sèche 2009-2014 permet aux communautés inféodées aux zones amont de se développer : Rhitrogena 404, Odontocorum 339, Agapetus 191, Silo 292...

Les traits bio-écologiques des peuplements de cette période reflètent alors parfaitement les spécificités de cette station :

- Vitesse eau : rapide (> 50 cm/s) Vi4
- Distribution transversale : chenal de rivière Dt1
- Microhabitats *preferendum* : dalles blocs pierres galets Mh1
- Valeur saprobiale : xénosaprobe V1
- Zones biologiques 4 : Alpes Jura Z2
- ...

L'axe principal de la figure 28 correspond ainsi à la distinction des caractères longitudinaux (amont-aval) d'un cours d'eau. Il marque une fracture séparant les communautés des prélèvements s'insérant dans une période à débit moyen depuis 2009 (figure 3), des communautés ayant subi la phase de sécheresse de mars 2004 à avril 2008 (figure 26).

Cette évolution décrit une résilience des communautés de la macrofaune benthique dont les affinités vis-à-vis des variables écologiques s'orientent vers des modalités caractérisant une rivière de tête de bassin versant plus en adéquation avec la Sorgue amont.

¹¹ Annexe 7 « Abréviation et contribution des modalités des traits »

2.3 Discussion des résultats de l'analyse de la chronique 2005-2014

Par rapport à l'IBGN, l'I₂M₂ améliore grandement la lecture de l'évaluation qualitative du cours d'eau. Sa note indicelle reste relativement constante depuis 2005. Il classe la Sorgue amont comme rivière en bon état et non pas en très bon état comme le fait l'IBGN.

La définition de cette station comme référence du type MP6 pourrait-être alors remise en question (Chandesris *et al.*, 2013). En outre, les rivières karstiques méditerranéennes comme la Sorgue se différencient fortement des autres rivières méditerranéennes par leurs fonctionnements hydrologiques (Gomila, 2007).

A la lecture des métriques de l'I₂M₂, l'ASPT (métrique de polluosensibilité) et la fréquence relative des espèces ovovivipares marquent une amélioration (en comparaison avec la période 2005-2008). Cependant, l'indice de Shannon montre, à l'inverse, un déséquilibre de 2011 à 2013.

Ce paradoxe est à modérer par le fait que la forte minéralisation de la Sorgue, comme toutes les rivières karstiques méditerranéennes, augmente la capacité d'accueil des groupes faunistiques nécessitant des eaux à forte teneur en calcaire (Gammaridae, Gastéropodes, Coléoptères). Il peut être alors expliqué par l'incertitude liée à la phase d'estimation de l'abondance des taxons prédominants (*Gammarus* par exemple) par les opérateurs. En effet, lors d'une présence de plusieurs centaines d'individus, l'opérateur fait appel à une méthode d'estimation (sachant que les protocoles obligent à dénombrer au minimum 40 individus) et peut ainsi surestimer l'abondance d'un taxon (Wiederkehr, 2015).

L'outil diagnostique, aide à l'interprétation de l'I₂M₂, suggère la présence d'altérations sur la qualité de l'eau durant les années 2005 à 2008 et des pressions croissantes sur la qualité de l'habitat. Un jeu de données physico-chimiques plus fourni aurait permis d'infirmier ou de confirmer ces suppositions.

Néanmoins, les résultats de l'analyse RLQ vont dans le même sens en identifiant une césure hydrologique différenciant les communautés sténoèces inféodées aux zones amonts depuis 2009, des communautés plus euryèces rencontrées dans les prélèvements de 2005 à 2008.

Cette spécificité peut être traduite par la disparition du gradient longitudinal lors des stress hydriques (Dumont *et al.*, 2007).

D'autre part, en milieu méditerranéen, l'existence de variations intra-annuelles des communautés a déjà été démontrée (Bonada *et al.*, 2007) mais la Sorgue amont étant sous l'influence du fonctionnement karstique, le soutien d'étiage naturel par des eaux fraîches limite alors les fortes amplitudes des paramètres abiotiques (Gomila, 2007).

De par un échantillon statistique restreint, l'analyse du possible effet de saisonnalité sur les peuplements n'a pu être confirmé ou infirmé. Pour cela, il aurait fallu réaliser des prélèvements automnaux durant la période 2009-2014.

Conclusion et perspectives

Dans une période où la préservation de la biodiversité et les dérèglements climatiques prennent une part importante dans les débats sociétaux, ce rapport permet de tirer un bilan de près de 30 années d'études hydrobiologiques de la Sorgue amont.

Malgré l'utilisation de méthodes différentes qui peuvent rendre l'analyse plus délicate, il semble essentiel de ne pas sous-estimer l'apport des longues chroniques. En effet, si on ne regarde que les 10 dernières années, on pourrait considérer que la Sorgue présente un peuplement globalement équilibré, avec une note indiciaire correcte. Mais l'analyse sur le plus long terme, même si elle est moins précise faute de méthodes homogènes, montre que le peuplement a subi une évolution non négligeable avec une dégradation probable de sa qualité.

Ce rapport a ainsi permis de mettre en lumière une augmentation importante de la conductivité de la Sorgue à la fin des années 90 concomitante à la disparition des prélèvements de *Dinocras*, taxon polluo-sensible. Cette dernière s'insère dans une tendance globale où les taxons psychrophiles et rhéophiles, caractérisant des eaux courantes et bien oxygénées, sont les premiers à disparaître (Floury, 2013).

Par ailleurs, l'étude se focalisant sur la période récente de 2005 à nos jours a mis en évidence la variable débit comme étant la principale variable environnementale impactant les structures des communautés faunistiques. Il convient toutefois de prêter attention à la faible quantité de données physico-chimiques à exploiter et aux liens entre les variables environnementales. En effet, lors des périodes d'étiages marqués, les polluants sont moins dilués, la température augmente et le dioxygène dissous diminue. Les années sèches 2005 à 2007 et même 2008 ont ainsi affiché des peuplements faunistiques ne reflétant pas le secteur amont de Fontaine de Vaucluse.

De surcroît, l'indice invertébrés multi-métriques classe cette portion de rivière, identifiée en tant que rivière de référence, comme étant seulement en bon état pour le paramètre invertébrés. L'outil diagnostique, lui, permet de supposer qu'il existe une forte pression sur la qualité de l'habitat et en l'occurrence sur son bassin environnant.

En somme, bien que la Sorgue à Fontaine de Vaucluse apparaisse en bon état à travers les indices invertébrés, elle subit de fortes pressions qui peuvent laisser dubitatif quant à son statut de rivière de référence pour l'hydro-écorégion méditerranéenne. Sa température fraîche due à son caractère karstique lui permet jusqu'à présent de minimiser l'impact des autres variables environnementales.

A la lumière de cette analyse sur l'évolution des peuplements benthiques de la Sorgue amont, une variabilité interannuelle durant la dernière décennie a été mise en avant. Ce phénomène a-t-il été commun à l'ensemble des rivières karstiques méditerranéennes ? Si tel était le cas, cela pourrait conduire à remettre en question la pertinence globale des données de référence acquises durant la période 2005-2007.

La sensibilité des invertébrés benthiques aux fluctuations hydrologiques ainsi démontrée, c'est la réponse globale de la biocénose de la Sorgue qui serait à étudier.

A une échelle temporelle plus étendue, l'interrogation sur la part du changement climatique global et celle des autres pressions anthropiques sur les perturbations biocénétiques de l'écosystème « bassin versant » demeure.

Références bibliographiques

-A-

AFNOR, 2004, Qualité de l'eau – Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN). AFNOR, Paris, France. NF T90-350, 15 p.

AFNOR, 2009, Qualité de l'eau - Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes. AFNOR, Paris, France, XP T90-333, 22p.

AFNOR, 2010, Qualité de l'eau – Traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro-invertébrés de cours d'eau. AFNOR, Paris, France. XP T90-388, 21 p.

ARMITAGE P.D, MOSS D, WRIGHT J.F, FURSE M.T, 1983. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running water sites. *Water Research*, 17, 333-347.

Asconit, 2013, Bilan du suivi de la qualité des eaux et des milieux aquatiques des Sorgues 2009-2011, Syndicat Mixte du Bassin des Sorgues, 89p.

ARCHAIMBAULT V, JOSSET A, ROGER M-C, 2012, Evaluation de l'incertitude liée à l'application du protocole d'échantillonnage des macro-invertébrés benthiques en cours d'eau peu profonds selon la norme XP T90-333, AQUAREF, 28p.

-B-

BAKALOWICZ M. et al., 1999, Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, AERMC, 44p.

BARRANGER M, 2013, Evaluation de la pertinence du réseau de référence pérenne en PACA au regard des exigences de la DCE et à l'aide des outils de bio-indication, DREAL PACA – Université de Pau et des Pays de l'Adour, 28p.

BASILICO L, MASSU N, SEON-MASSIN N, 2010, Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion, Les rencontres-synthèses de l'ONEMA, 41p .

BLONDEL T, 2008, Traçage spatial et temporel des eaux souterraines dans les hydrosystèmes karstiques par les matières organiques dissoutes : expérimentation et application sur les sites du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel – Pays d'Apt et de Fontaine de Vaucluse, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 192p, HAL Id :tel-00684295, 2012.

BONADA N, RIERADEVALL M, PRAT N, 2007, Macroinvertebrate community structure and biological traits related to flow permanence in a Mediterranean river network. *Hydrobiologia*, 589, 91-106.

BREIMAN L, 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.

Brgm PAC06F – Calcaires du crétacé inférieur des monts de Vaucluse et de la montagne du Luberon

-C-

CHANDESRIS A, FERREOL M, VALETTE L, 2013, Réseau de référence pérenne : évaluation des pressions sur la base des outils nationaux existants, Partenariat IRSTEA/ONEMA, 101p.

CHESEL D, L'ordination directe, <https://pbil.univ-lyon1.fr/R/pdf/cssb6.pdf> consulté en décembre 2015, 25p.

-D-

DCE, Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

DUCLUZAUX B, Traçage de 66.7 km dans le karst de la Fontaine de Vaucluse, https://lanesquepropre.com/uploaded/Tracages_Fontaine_Vaucluse.pdf consulté en août 2015.

DUMONT B, PONT D, CARREL G, 2007, Quelles sensibilités biologiques face au réchauffement dans les cours d'eau français métropolitains ?, CEMAGREF, 15p.

DUMONT B, MOREL A, ARCHAMBAUD G, 2013, Etude expérimentale d'un régime réservé. Moyenne Durance, IRSTEA, 93p.

DRAY S, Introduction à l'analyse RLQ, <https://pbil.univ-lyon1.fr/R/pdf/ter7.pdf> consulté en décembre 2015, 18p.

-E-

ELBRECHT V, TOLLRIAN R, LEESE F, 2012, Connectivity and dispersal potential of *Dinocras cephalotes* populations (Plecoptera): A population genetic case study in the Sauerland region, Ruhr University Bochum, Departement of Animal Ecology, Evolution and Biodiversity, 1p.

ELBRECHT V, 2013, Dispersal potential of *Dinocras cephalotes* (Plecoptera): a population genetic case study in the Sauerland region, , Ruhr University Bochum, Departement of Animal Ecology, Evolution and Biodiversity, 121p.

EL IMRANI K, KETTANI K, 2012, Dynamique de la structure des communautés benthiques après des perturbations hydrologiques et morphologiques dans l'oued Ez-Zarka (bassin Martil, Rif occidental, Maroc), Méditerranée 2012/I (n°118), 124p.

-F-

FAVREL C, 1998, Ecophysiologie de la larve de *Dinocras cephalotes* (Plécoptère, Perlidae) exposé à un milieu acidifié (pH acide, faible minéralisation et forte consommation en aluminium), Université de Metz, Centre de Recherches Ecologiques, 257p.

FLOURY M, DELATTRE C, ORMEROD S.J, SOUCHON Y, 2012, Global versus local change effects on large European river, *Science of the Total Environment*, Volume 441, 15 December 2012, p 220–229.

FLOURY M, USSEGLIO-POLATERA P, FERIOL M, DELATTRE C, SOUCHON Y, 2012, Global climate change in large European rivers : long-term effects on macroinvertebrate communities and potential local confounding factors, *Global Change Biology*.

FLOURY M, 2013, Analyse des tendances d'évolution de peuplements de macroinvertébrés benthiques dans un contexte de réchauffement des eaux, Université Blaise Pascal (Auvergne), 234p.

FRUTIGER A, 1987, Investigation on the Life-History of the stonefly *Dinocras cephalotes* *Aquatic Insects*, Vol 9 (1987), No.1, pp.51-63

-G-

GABRIELS W, LOCK K, de PAUW N, GOETHALS P.L, 2010, Multimetric Macroinvertebrate Index Flanders (MMIF) for biological assessment of rivers and lakes in Flanders (Belgium). *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 40, 199-207.

GOMILIA H, 2007, Définition d'une méthode de caractérisation des cours d'eau de type méditerranéen et application dans le cadre de la DCE, Agence de l'eau, 216p

GUIDICELLI J, ARNAUD O, GARONNE C, LE GUELLEC G, 2000, Inventaire Hydrobiologique (macroinvertébrés) NATURA 2000 (PR 82), Maison Régionale de l'Eau, 22p.

GUIDICELLI J, OLIVARI G, 2010, Les cours d'eau méditerranéens à régime de soutien karstique, Spécificités écologiques et hydrobiologiques, *Ecologia mediterranea* vol 36, 19p

-H-

HUGGINS D.G, MOFFETT M, 1998, Proposed biotic and habitat indices for use in Kansas Streams, report n°35 of the Kansas Biological Survey, University of Kansas, 2003, 166p.

-I-

IANNILLI V, TIerno DE FIGUEROA J, FOCHETTI R, 2002, Life cycle of *Dinocras cephalotes* (Curtis, 1827) in central Italy (Plecoptera, Perlidae), *Bol. S.E.A.*, n°31 (2002) : 177-179.

-J-

JACQUET K, PRODON R, Analyses multivariées avec ade4 dans R , <https://pbil.univ-lyon1.fr/R/pdf/jacquet-prodon.pdf>, 32p.

-L-

LEIGH C, BONADA N, BOULTON A.J, HUGUENEY B, LARNED S.T, VANDER VORSTE R, DATRY T, 2015, Invertebrate assemblage responses and the dual roles of resistance and resilience to drying in intermittent rivers, *Aquatic Sciences* 78, p291-301.

LE BARON M, 1988, Etude hydrobiologique de la Sorgue, Conseil Supérieur de la Pêche.

-M-

Maison Régionale de l'Eau, 2006, Etude hydrobiologique des Sorgues, Compte rendu de prélèvement, Syndicat Mixte du Bassin des Sorgues, 36p.

Maison Régionale de l'Eau, 2010, Etude hydrobiologique des Sorgues, Syndicat Mixte du Bassin des Sorgues, 43p.

MALAVOI J.R, BRAVARD J.P, 2010, Eléments d'hydromorphologie fluviale, ONEMA, 224p.

MALAVOI J.R, GARNIER C.C, LANDON N, RECKING A, BARAN P, 2011, Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière, ONEMA, 216p.

MONDY C, USSEGLIO-POLATERA P, 2011, Développement et optimisation de l'indice invertébrés multimétrique I_2M_2 pour les cours d'eau, Rapport d'avancement du projet, ONEMA décembre 2011, 129p.

MONDY C, VILLENEUVE B, ARCHAIMBAULT V, USSEGLIO-POLATERA P, 2012, A new macroinvertebrate-based multimetric index (I_2M_2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands: a taxonomical and trait approach. *Ecological Indicators*, 18, 452-457.

MORI N, BRANCELJ A, 2005, Macroinvertebrate communities of karst springs of two river catchments in the Southern Limestone Alps (the Julian Alps, NW Slovenia), *Aquatic Ecology* (2006) 40:69 –83.

MOUTHON J, 1986, *Emericia patula* (Gasteropoda, Emmericidae) et *Menetus dilatatus* (Gasteropoda Planorbidae), deux espèces nouvelles pour la faune de France, *Basteria*, 50 : 181-188, 1986.

-O-

OLLIER J, 1991, Les macroinvertébrés benthiques de la Sorgue de Velleron (Vaucluse). Essai d'étude hydrobiologique, Université Paris-Sud, 116p.

OSCOZ J, DURAN C, 2004, Contribucion al conocimiento de los plecoterios (Insecta : Plecoptera) en la cuenca del Ebro, *Munibe (Ciencias Naturales-Natur Zientziak)* • NO. 55 (2004) • 183-196 • ISSN 0214-7688

-P-

PARAIS F, 2010, Traitement et exploitation des données hydrobiologiques 2007 du réseau contrôle de surveillance de Basse-Normandie, DREAL Basse-Normandie.

PERU N. et DOLEDEC S, 2009, Outil de caractérisation des milieux aquatiques basé sur les traits biologiques des macroinvertébrés benthiques : application au bassin Rhône-Méditerranée, Agence de l'eau RMC, UMR CNRS, 99p.

PRIETO-MONTES M, FERREOL M, USSEGLIO-POLATERA P, MONDY C, 2012, Invertébrés benthiques : un nouvel outil de bio-indication I₂M₂ Principes et premiers résultats, ONEMA – CEMAGREF, février 2012, 38p.

-R-

RAMBAUD A, 1974, Contribution à l'étude des pollutions du réseau hydrographique de la Sorgue (Vaucluse), Faculté de Pharmacie de Montpellier, 317p.

REYJOL Y, SPYRATOS V, BASILICO L, 2012, Bioindication : des outils pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques, Les rencontres-synthèses de l'ONEMA, 55p.

RIGHI-CAVALLARO K.O et al., 2010 Structure of macroinvertebrate communities in riffles of neotropical karst stream in the wet and dry seasons, Acta Limnologica Basiliensia, vol 22, n°3, p.306-316.

-S-

SHANNON C.E, WEAVER W, 1963, The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, USA.

SOUCHAUD L, 2014, Élaboration d'un outil de suivi de la qualité écologique des têtes de bassin dans le Parc National des Cévennes, SupAgro Florac-Université de Franche Comté, 33p.

-T-

TACHET H, RICHOUX P, BOURNAUD M & USSEGLIO-POLATERA P, 2010, Guide des invertébrés d'eaux douces, CNRS Editions, Paris, France.

TIZIANO B, FENOGLIO S, MALACARNE G, 2007, Diet of *Dinocras cephalotes* and *Perla marginata* (Plecoptera: Perlidae) in an Apennine stream (northwestern Italy), Can. Entomol. 139: 358–364 (2007)

-U-

USSEGLIO-POLATERA P, WASSON J-G, 2005, Protocole de prélèvement des invertébrés benthiques sur les sites de référence, Stage IFORE avril 2005.

USSEGLIO-POLATERA P, LARRAS F, COULAUD R, 2015, Bio-évaluation des cours d'eau peu profonds basée sur le compartiment des macroinvertébrés benthiques : I₂M₂ et outil diagnostique, LIEC CNRS UMR 7360 (formation ONEMA), 59p.

-V-

VERNEAUX J, TUFFERY G, 1967, Une méthode zoologique pratique de détermination de la qualité biologique des eaux courantes. Indices biotiques. Ann. Sc. Univ. Besançon 3 : 79-89.

-W-

WASSON J-G, VILLENEUVE B, MENGIN N, PELLA H, CHANDESRIIS A, 2006, Quelle limite du "bon état écologique" pour les invertébrés benthique en rivières?, Ingénieries n°47.

WIEDERKEHR J, 2015, Estimation des incertitudes associées aux indices macroinvertébrés et macrophytes pour l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau, Université de Strasbourg - Aquabio, 211p.

WOODWARD G, BONADA N, FEELEY H.B, GILLER P.S, 2015, Resilience of a stream community to extreme climatic events and long-term recovery from a catastrophic flood, Freshwater Biology, Vol 60, Issue 12, p2497-2510.

Annexes

Annexe 1 : Exemple de fiche terrain de prélèvement des invertébrés	54
Annexe 2 : Exemple de liste taxonomique produite suite à un prélèvement	55
Annexe 3 : Tableau servant au calcul de l'IBGN	56
Annexe 4 : I ₂ M ₂	57
Annexe 5 : Focus sur les Perlidae	64
Annexe 6 : Evolution des traits des communautés	65
Annexe 7 : Abréviation et contribution des modalités des traits	70
Annexe 8 : Tableau récapitulatif des dénombrements de taxons pour chaque prélèvement d'invertébrés de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005.....	73

Annexe 1 : Exemple de fiche terrain de prélèvement des invertébrés

ENG 31-1: Fiche terrain invertébrés
Date d'application : 02/12/2013
Indice de révision : E
Page 1/2

Prélèvement de macroinvertébrés

Norme : XP T90-333

Prélevement effectué par : ALBERT Luo
Acompagnateurs : VASSAL Véronique
Date : 06/08/2014
Code de la Station : 8123700
Cours d'eau : SORGUE
Nom de la station (+ localisation) : Fontaine de Vouloise (aval Grignon)
Altitude (m) : 121
Largeur au débit de Plein Bord (en m) : 15
Longueur totale de la station (en m) : 180
Largeur mouillée moyenne (en m) : 17,7
Superficie mouillée de la station (m²) : 3180
Superficie maximale d'un substrat marginal (m²) : 158

Coordonnées en Lambert 83 :
X Amont (m) : 870697
Y Amont (m) : 6315784
X Aval (m) : 870690
Y Aval (m) : 6315907

Matériau :
N° Tamis (600 µm) : TAM 07
N° Tamis (50mm) : TAM 09
N° Surber : SUR 10
N° Haveneau : HAV 06
Conservateur : ALBERT Luo

Type CEMAOREP : MPS

D = Dessant : [5% - 100%]
M = Marginal : [0% - 5%]
MNR = Marginal non Représentatif : [0% - 5%]
(non prélevé en raison de son caractère exceptionnel, ou lié à une singularité morphologique)
F = Fossés non pris en compte - Types de fossés non prélevés en raison d'une surface minimale critique inférieure à 1/20ème de a2, soit l'écoulyte et les écoulytes de la stade (sans)

Spécificité par habitat (= accepté entretenu/croisé) : a > b > c > d
Phase A : substrat homogène (M) selon l'ordre d'habitabilité
Phase B : substrat diversifié (D) selon l'ordre d'habitabilité
Phase C : substrat diversifié (D) en pré-équilibre la représentativité des habitats

Pourcentage à retenir par prélèvement échantillon réajusté sur les substrats dessants = 10 %
La somme des espèces relatives D et M doit être égale à 100% (sur MNR et F non échantillonnés)

Les prélèvements sont réalisés au surface, et le benthos est retiré, ce n'est pas le cas des échantillons

Largeur mouillée (m)		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
(en mètre 3 tranches) (nombre avec une décimale et largeur < 5 m)		17,0	16,0	20,0							

Substrats	classes de vitesses																				No de prél. réalisés
	N6 > 75 cm/s Rapide				N5 25 à 75 cm/s Moyenne				N3 5 à 25 cm/s Lente				N1 0 à 5 cm/s Nulle								
Nature du Substrat	% estimé des substrats (valeur entière)	D / M / MNR / P	% rectang après phase B	Superficie par habitat	N° Prélév	Phase	hauteur d'eau + H si haveneau	Superficie par habitat	N° Prélév	Phase	hauteur d'eau + H si haveneau	Superficie par habitat	N° Prélév	Phase	hauteur d'eau + H si haveneau	Superficie par habitat	N° Prélév	Phase	hauteur d'eau + H si haveneau		
11 Bryophytes	01	18	D	a	5	PhB	50	b	12	PhC	40	c								2	
10 Spermaphytes immergés (hydrophytes)	02	18	D	a	6	PhB	30	a	6	PhB	30	b								1	
9 Débris organiques grossiers (litières) (brindilles < 5 mm)	03	1	M										a	1	PhA	66 H				1	
8 a) Chevelus ravinaires libres dans l'eau	028	3	M										a	2	PhA	15	b			1	
8 b) Substrat ligneux (branchages > 5 mm)																					
7 Sédiments minéraux de grande taille (pierres, galets) (plus que longueur de 25 à 250 mm)	024	50	D	a	7 10	PhB PhC	30 20	b	8 11	PhB PhC	15 15	c	9	PhC	10					5	
6 Blocs faiblement déplaçables (plus grande longueur > 250 mm)	030	2	M	e				a	3	PhA	45 H	b								1	
5 Granulats grossiers (graviers) (2,5 à 25 mm)	09	2	M					c				a	4	PhA	75 H	b				1	
4 Spermaphytes émergents (hélophytes)	010																			0	
3 Vases Sédiments fins (< 0,1 mm) avec débris organiques fins	011																			0	
2 a) Sables (< 2mm)	025	1	M																	0	
2 b) Limons (couche > 1cm)																					
1 Algues	018	4	M	d									c							0	
0 Surfaces uniformes dures (roches, caillots, maînes et argiles compactes)	029																			0	
Total %																				12	

Annexe 2 : Exemple de liste taxonomique produite suite à un prélèvement

Nom de la station	Code station	Déterminateur	Date
Fontaine de Vaucluse	6123700	Christine DUPART	10/07/2013

Taxon indicateur (et GFI de 1 à 9) : 8 Odontoceridae
Variété Taxinomique (et classe de variété de 1 à 14) : 34 classe 10
Note équivalent IBGN PhA + PhB : 17/20 robustesse 16/20

Saisie et calcul vérifiés le :

Par :

Fontion :

Visa :

TAXON PERE	NIVEAU TAXONOMIQUE	TAXON SANDRE	CODE SANDRE	1	2	3	4	PhA	5	6	7	8	PhB	9	10	11	12	PhC
Leuctridae	Genre	Leuctra	69				4	4					3	3	1		17	18
Glossosomatidae	Genre	Agapetus	191	1		8	1	10	5	28	14	2	49	2	4	3	3	12
Glossosomatidae	Genre	Glossosoma	190					0			1		1					0
Goeridae	Genre	Silo	292					0	1				1					0
Hydroptilidae	Genre	Hydroptila	200				1	1					0					0
Lepidostomatidae	Genre	Lepidostoma	305	1	1			2					0					0
Limnephilidae	Sous-famille	sF. Limnephiliinae	3163		1								0		1	2	3	
Odontoceridae	Genre	Odontocerum	339			1		1	4	4			1	9	1	1	3	2
Psychomyiidae	Genre	Lype	241		1			1					0					0
Psychomyiidae	Genre	Tinodes	245				12	12		9	5	1	15		18	6	8	32
Rhyacophiliidae	Genre	Rhyacophila	183	1			1	2	4	10	2	1	17	8		2	7	17
Sericostomatidae	Genre	Sericostoma	322			1		1					0					0
Baetidae	Genre	Baetis	364	24	2		16	42	100	20	21	3	144	58	5	3	31	97
Ephemeridae	Genre	Ephemera	502			2		2					0					0
Ephemerellidae	Espèce	Seratella ignita	451	25			2	27			1		1	1		2		3
Heptageniidae	Genre	Rhithrogena	404					0	5	14	5	4	28	1			5	6
Elmidae	Genre	Elmis	618	10	19	1	3	33	13	78	12	116	4	10	8	41	63	
Elmidae	Genre	Esolus	619	1	1			2		2	8	1	11		2	1		3
Elmidae	Genre	Limnius	623				1	1	12	24	22	10	68	1	9		3	13
Elmidae	Genre	Riolus	625					0		2	45	4	51		2		6	8
Ceratopogonidae	Famille	Ceratopogonidae	819		1	2		3					0					0
Chironomidae	Famille	Chironomidae	807	2	2	6	40	50	1	2	2		5		1	2	6	9
Empididae	Famille	Empididae	831					0			2		2	1			1	2
Limoniidae	Famille	Limoniidae	757			1		1		1			1					0
Psychodidae	Famille	Psychodidae	783				1	1					0					0
Simuliidae	Famille	Simuliidae	801	12	7	1	1	21	32	1	1		34	1	1		1	3
Tabanidae	Famille	Tabanidae	837					0					0	1				1
Gammaridae	Genre	Gammarus	892	596	414	119	439	1568	448	1440	1680	248	3816	3696	232	320	860	5108
Ancylidae	Genre	Ancylus	1028				1	1		2			3	4	1		2	7
Emmericiidae	Genre	Emmericia	986	12	48	10	6	76	21	1	5		27	2	4	16	3	25
Hydrobiidae	Genre	Belgrandia	982					0	9	11	2	2	24	5	10	22	17	54
Hydrobiidae	Genre	Bythinella	992	8	44	1		53	10		6	1	17		1	2		3
Hydrobiidae	Genre	Potamopyrgus	978	6		1	3	10		1			1					0
Lymnaeidae	Genre	Radix	1004	4				4					0					0
Neritidae	Genre	Theodoxus	967					0	9	7	29		45	1	14		58	73
Planorbidae	Genre	Bathyomphalus	1011		1	6		7					0					0
Valvatidae	Genre	Valvata	972			19		19					0					0
Glossiphoniidae	Famille	Glossiphoniidae	908			1		1			2		2		2		1	3
Dendrocoelidae	Famille	Dendrocoelidae	1071					0					0			1		1
Planariidae	Famille	Planariidae	1061	1	40	1		42	1			8	9	2	1	8		11
OLIGOCHETES	CLASSE	OLIGOCHETES	933	2		176	1	176	2	1		1	4	1	1	4		6
NEMATODES	CLASSE	NEMATODES	1089			1		1					0					0
HYDRACARIENS	ORDRE	HYDRACARIENS	906	p	p	p	p	40	p	p			10	p	p	p	p	13

Annexe 3 : Tableau servant au calcul de l'IBGN

		Classe de variété													
		14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
		Σ^t													
	GI	> 50	49	44	40	36	32	28	24	20	16	12	9	6	3
		45	41	37	33	29	25	21	17	13	10	7	4	1	
Taxons															
Chloroperlidae	9	20	20	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9
Perlidae															
Perlodidae															
Taeniopterygidae															
Capnidae	8	20	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
Brachycentridae															
Odontoceridae															
Philopotamidae															
Leuctridae	7	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7
Glossosomatidae															
Beraeidae															
Goeridae															
Leptophlebiidae															
Nemouridae	6	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
Lepidostomatidae															
Sericostomatidae															
Ephemeridae															
Hydroptilidae	5	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
Heptageniidae															
Polymitarcidae															
Potamanthidae															
Leptoceridae	4	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
Polycentropodidae															
Psychomyiidae															
Rhyacophillidae															
Limnephilidae ^{a)}	3	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
Hydropsychidae															
Ephemerellidae ^{a)}															
Aphelocheiridae															

Tableau 3 — Valeurs de l'IBGN selon la nature et la variété taxonomique de la macrofaune (fin)

		Classe de variété													
		14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
		Σ^t													
	GI	> 50	49	44	40	36	32	28	24	20	16	12	9	6	3
		45	41	37	33	29	25	21	17	13	10	7	4	1	
Taxons															
Baetidae ^{a)}	2	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Caenidae ^{a)}															
Eimidae ^{a)}															
Gammaridae ^{a)}															
Mollusques															
Chironomidae ^{a)}	1	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Asellidae ^{a)}															
Achètes															
Oligochètes ^{a)}															

a) Taxons représentés par au moins 10 individus : les autres, par au moins 3 individus

Annexe 4 : I₂M₂Développement (Mondy *et al.*, 2012) :

- Un jeu de données, recueillies entre 2004 et 2009, sur 1725 stations localisées sur 1305 cours d'eau, a été utilisé en le divisant pour 75% comme données d'apprentissage et 25% en données test.

- **Prélèvements :**

Les données faunistiques ont été recueillies grâce au protocole de prélèvement et de traitement du réseau de référence et le protocole multi-habitat normalisé (AFNOR 2009) qui est une version simplifiée du premier.

Ce protocole consiste à identifier sur le terrain les supports marginaux (< 5%) et les supports dominants (≥ 5%), puis réaliser 3 phases de micro-prélèvements :

PhA (ou Bocal 1) : 4 micro-prélèvements sur les supports marginaux suivant l'ordre d'habitabilité.

PhB (ou Bocal 2) : 4 micro-prélèvements sur les supports dominants suivant l'ordre d'habitabilité.

PhC (ou Bocal 3) : 4 micro-prélèvements sur les supports dominants en privilégiant la représentativité des habitats.

- **Caractérisation environnementale de chaque station :**

Chaque station a été caractérisée du point de vue de la qualité de l'eau et de l'intégrité physique de l'habitat selon les catégories de pressions représentées ci-après :

<u>Qualité de l'eau</u>	<u>Intégrité physique de l'habitat</u>
Matières organiques et oxydables (MOOX)	Voies de communication
Matières azotées (hors nitrates)	Couverture de la ripisylve
Nitrates	Urbanisation
Matières phosphorées	Risque de colmatage
Matières en suspension (MES)	Instabilité hydrologique
Acidification	Degré d'anthropisation
Micro-polluants minéraux (e.g. métaux)	Intensité de la rectification
Pesticides	
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	
Autres micro-polluants organiques	

³Tableau des 17 catégories de pressions pouvant altérer la qualité de l'eau ou l'intégrité physique de l'habitat

Au total, 173 paramètres physico-chimiques ont été utilisés pour définir les 10 catégories de pressions sur la qualité de l'eau en distinguant un niveau de pression faible correspondant à minima au bon état et un niveau significatif correspondant à maxima à un état moyen, et cela en se basant sur les valeurs seuils du SEQ-Eau version 2. Pour caractériser chaque station, le principe du paramètre le plus dégradant a été retenu sur une moyenne des 6 mois précédant la

date d'échantillonnage faunistique.

Dans la même optique, en ce qui concerne l'intégrité physique de l'habitat, ce sont 10 paramètres hydro-morphologiques, répartis dans les sept catégories de pression, qui ont été choisis. L'IRSTEA a défini lui-même les seuils. Le principe du paramètre le plus dégradant a, ici aussi, été retenu.

· Sélection des métriques :

En parallèle, la sélection des métriques s'est faite sur un pool de 2525 métriques biologiques calculées en fonction des différentes phases de micro-prélèvements.

Les valeurs de chaque métrique ont été transformées en ratio de qualité écologique (Ecological Quality Ratio : EQR) entre la situation observée et la situation de référence, pour le même type de cours d'eau, dans le but de pouvoir comparer entre eux des types de cours d'eau différents. Cela permet donc d'intégrer la typologie.

$EQR = (Obs - Worst) / (Ref - Worst)$

"Obs" étant la valeur de la métrique obtenue pour un échantillon donné,

"Ref" étant la valeur de référence pour le même type de cours d'eau,

"Worst" étant la pire valeur connue de la métrique au niveau national quel que soit le type de cours d'eau.

On distingue alors les métriques à caractère positif (métrique croissante) et celle à caractère négatif (métrique décroissante) de leurs réponses face à une catégorie de pression donnée. Ainsi, pour les métriques décroissantes, "Worst" correspond aux notes les plus élevées et "Ref" aux plus basses.

Les métriques à sélectionner devaient répondre aux 4 critères de sélection évoqués précédemment.

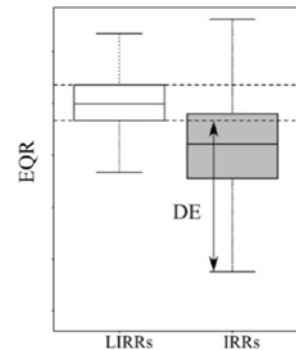
* Pour la spécificité d'une métrique, a été étudié le nombre de catégories de pression (parmi les 17 considérées) pour lesquelles la métrique montrait une différence marquante de ses valeurs entre les opérations caractérisées par un niveau faible et celles caractérisées par un niveau significatif. La métrique doit réagir clairement à au moins 7 des 10 catégories de pression liées à la qualité de l'eau et à au moins 5 des 7 catégories de pression liées l'intégrité physique de l'habitat.

475 métriques y répondent significativement sur les 2525 testées.

* La capacité de discrimination de chaque métrique par catégorie de pression (DE, d'après Offenbock *et al.* 2004) permet une pondération de ces métriques. C'est leur capacité à répondre de manière différente entre les sites perturbés et les sites pas ou peu perturbés.

L'efficacité de discrimination d'une métrique pour un type de pression donné est alors « la proportion d'assemblages faunistiques¹² sur sites perturbés (Impacted River Reaches : IRRs) présentant une valeur d'EQR plus faible que le premier quartile de la distribution des valeurs de cette métrique dans les sites peu perturbés (Least Impacted River Reaches : LIRRs) ». De cette façon on peut privilégier les métriques discriminant plus efficacement un type de perturbation donné. La condition minimale pour être une métrique sélectionnée est qu'au moins 60% des assemblages soumis à une pression (en moyenne sur 17 types de pression) soient identifiés.

393 métriques présentent effectivement une valeur moyenne de DE supérieure à 0.6.



* Une métrique est considérée stable en condition de référence si son coefficient de variation (CV : rapport entre l'écart type et la moyenne) de ses valeurs d'EQR dans les assemblages provenant des LIRRs est inférieur à 0,333.

872 métriques sont alors considérées stables.

* A ce stade de test, seules 186 métriques sur les 2525 initiales répondent à l'ensemble de ces 3 premiers critères. Elles sont alors classées en 30 groupes de métriques similaires fournissant le même type d'information taxonomique, biologique ou écologique.

Seule la métrique présentant le DE moyen le plus élevé du groupe est retenu.

Au final, 30 métriques sont candidates à l'I₂M₂.

• Principe de calcul de l'indice

- Pour les 17 pressions, un sous-indice est calculé pour chacune d'entre elles, chaque métrique est affectée d'un poids correspondant à son pouvoir de discrimination pour le type de pression considéré :

$$\text{sous-indice}^{\text{pression}} = \frac{\sum (EQR_m^{\text{pression}} \times DE_m^{\text{pression}})}{\sum DE_m^{\text{pression}}}$$

- La moyenne arithmétique de ces 17 sous-indices est calculée pour créer l'indice final.

$$\text{Indice} = \frac{\sum (\text{sous-indice}(P_i))}{n} ; \text{ (avec } P_i \text{ catégorie de pression et } n \text{ le nombre de catégorie).}$$

• Sélection finale des métriques de l'indice

L'objectif est de tester chacune des 30 métriques sélectionnées puis de les associer progressivement entre elles en observant le gain de discrimination moyen de l'indice résultant. Pour cela, un processus itératif est employé sur 60% du jeu d'apprentissage.

* Chaque métrique est associée aux 29 autres. Le gain relatif en discrimination est calculé pour chaque type de pression. La métrique qui offre le gain le plus important est sélectionnée pour former un indice bi-métriques. Au total ce sont donc 30 indices bi-métriques qui sont

¹² Les différents types d'assemblages sont en fait les différentes échelles de calcul : bocal individuel ou B1+B2 (substrats habitables) ou B2+B3 (substrats dominants) ou B1+B2+B3 (station entière).

constitués.

* L'adjonction des nouvelles métriques est effectuées pour chaque couple (selon la même méthode) et s'arrête quand l'ajout d'une nouvelle métrique n'amène plus un gain de DE significatif. Au final, 30 indices multi-métriques ont été créés. Le nombre de métriques retenues pour les indices varie de 2 à 8.

* Ces 30 indices sont alors comparés sur :

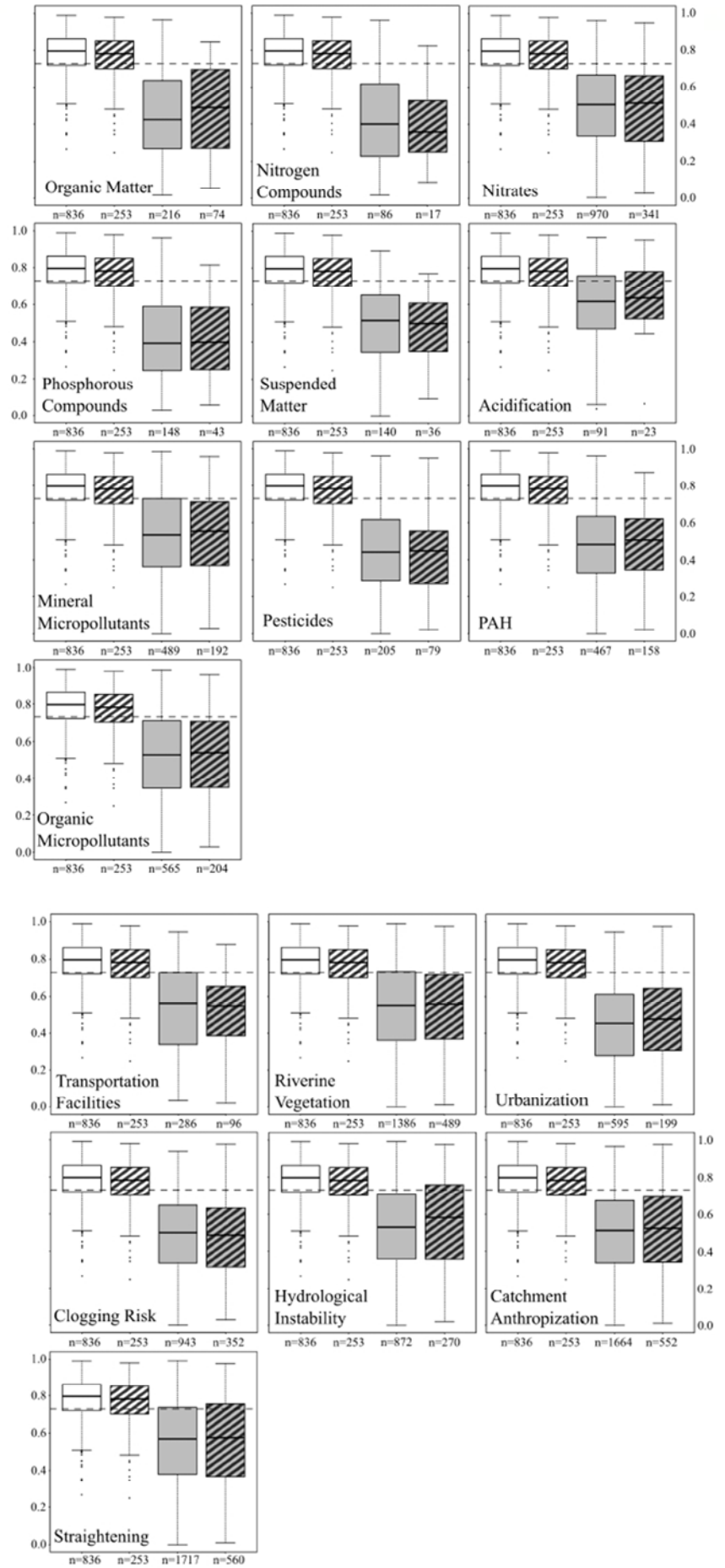
- leur efficacité de discrimination moyenne sur les 17 types de pressions,
- leur stabilité de valeurs d'indices, en condition de moindre impact anthropique, entre données d'apprentissage et données test,
- leur robustesse : pas de différence significative de DE moyen entre données d'apprentissage et données test,
- leur adéquation à la DCE

Sur 5 indices qui ne montrent aucune différence significative de stabilité et de robustesse entre le jeu de données d'apprentissage et le jeu de données test, un seul remplit tous les critères de la DCE. Il s'agit de l'indice final nommé I_2M_2 .

Test de I_2M_2 :

Voici la comparaison des distributions des valeurs d'EQR de l' I_2M_2 sur je jeu de données LIRRs en blanc et IRRs en gris pour le jeu d'apprentissage en couleur uniforme et rayé pour les données test.

Cette comparaison s'effectue sur les 10 catégories de pression relatives à la qualité de l'eau et aux 7 catégories de pression hydromorphologique. (Mondy *et al.*, 2012)



Exemple de calcul :

Prenons pour exemple le prélèvement du 10 juillet 2013 de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700. Ce site possède le « type national » MP6 correspondant au type simplifié 26 pour l'I₂M₂.

Les valeurs minimales des métriques et les valeurs de référence pour cette typologie sont :

Métriques I ₂ M ₂	Pire valeur observée	Référence type 26
Shannon [B1+B2]	1,59	3,68
ASPT [B2+B3]	4,45	6,77
Polyvoltinisme [B1+B2+B3]	0,46	0,24
Ovoviviparité [B1+B2+B3]	0,29	0,03
Richesse [B1+B2+B3]	21,36	59,36

Le calcul des métriques se fait en fonction des combinaisons de bocaux prédéfinis :

Shannon [B1+B2]	ASPT [B2+B3]	Polyvoltinisme [B1+B2+B3]	Ovoviviparité [B1+B2+B3]	Richesse [B1+B2+B3]
1,516	6,15	0,282	0,127	43

Les EQR de ces valeurs sont calculés d'après les valeurs de référence établies pour la typologie du site :

ShannonEQR = $(1.516 - 1.59) / (3.68 - 1.59)$ soit 0 (rappel : valeurs comprise entre 0 et 1)

ASPT EQR = $(6.15 - 4.45) / (6.77 - 4.45) = 0.733$

PolyvoltEQR = $(0.282 - 0.46) / (0.24 - 0.46) = 0.809$ (rappel : métrique décroissante)

Les valeurs en EQR sont les suivantes :

Shannon [B1+B2]	ASPT [B2+B3]	Polyvoltinisme [B1+B2+B3]	Ovoviviparité [B1+B2+B3]	Richesse [B1+B2+B3]
0	0,733	0,809	0,628	0,569

Ces valeurs d'EQR vont servir à calculer un sous-indice pour chacune des 17 pressions. Chaque métrique est pondérée par un coefficient différent pour chaque sous-indice.

	Shannon [B2+B3]	ASPT [B2+B3]	Polyvoltinisme [B2+B3]	Ovoviviparité [B3]	Richesse [B1+B2+B3]
Matières Organiques et Oxydables	0,674	0,774	0,766	0,758	0,672
Matières Azotées hors Nitrates	0,749	0,854	0,798	0,725	0,751
Nitrates	0,599	0,783	0,743	0,756	0,622
Matières Phosphorées	0,695	0,856	0,826	0,789	0,706
MES	0,669	0,743	0,811	0,681	0,768
Acidification	0,523	0,537	0,619	0,492	0,564
Micropolluants Minéraux	0,610	0,703	0,649	0,593	0,611
Pesticides	0,691	0,884	0,812	0,731	0,690
HAP	0,676	0,792	0,787	0,702	0,701
Autres micropolluants Organiques	0,559	0,761	0,692	0,673	0,584
Voies de communication	0,629	0,651	0,691	0,572	0,672
Ripisylve	0,600	0,697	0,660	0,623	0,601
Urbanisation 100m	0,711	0,805	0,771	0,709	0,706
Risque de Colmatage	0,638	0,808	0,775	0,766	0,635
Instabilité Hydrologique	0,623	0,651	0,658	0,623	0,638
Anthropisation BV	0,626	0,764	0,729	0,690	0,629
Rectification	0,598	0,651	0,623	0,590	0,601

Exemple pour la pression nitrates :

$$i_2m_2^{\text{nitrates}} = \frac{(0.599 \times 0) + (0.783 \times 0.733) + (0.743 \times 0.809) + (0.756 \times 0.628) + (0.622 \times 0.569)}{(0.599 + 0.783 + 0.743 + 0.756 + 0.622)}$$

$$i_2m_2^{\text{nitrates}} = 0.5720$$

La note finale de l'I₂M₂ est la moyenne de tous les sous-indices de pression.

$$I_2M_2 = \frac{\sum_p i_2m_2^{Pi}}{17}$$

On obtient ici 0.589.

Les limites inférieures des classes d'état pour le type national MP6 sont les suivantes :

Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
0.6916	0.4362	0.2908	0.1454	0

Le prélèvement de 2013 est donc classé en **bon état** pour le paramètre invertébrés benthiques.

Exemple de calcul avec l'outil diagnostique

Prenons pour exemple le prélèvement du 10 juillet 2013 de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700.

Voici les probabilités d'altération pour chaque type de pression. Un risque de pression est considéré comme significatif lorsqu'il est supérieur à 0.5.

Matière organique WQ1	Composés azotés WQ2	Nitrates WQ3	Composés phosphorés WQ4	Acidification WQ6	Pesticides WQ8
0.34	0.27	0.41	0.45	0.52	0.30

Voies de communication HD1	Ripisylve HD2	Urbanisation HD3	Risque de colmatage HD4	Instabilité hydrologique HD5
0.52	0.36	0.60	0.34	0.61

Il faut cependant garder à l'esprit qu'il s'agit de probabilités de pressions. Les informations qui peuvent en être tirées doivent rester des orientations de diagnostic et non des preuves tangibles de pressions.

Annexe 5 : Focus sur les Perlidae

Une recherche des Dinocras a été effectuée sur la station 06123700 en s'affranchissant de plan d'échantillonnage normé via une stratégie d'échantillonnage aléatoire.

Cela permet d'augmenter l'effort d'échantillonnage en éludant ainsi les incertitudes quant aux prélèvements de taxons rares lorsqu'un protocole à 12 échantillons est suivi.

Cadre de l'opération :

En s'appuyant sur les connaissances bio-écologiques des Dinocras, Tachet 2010, notre prospection s'est faite en période d'étiage le 13 août 2015 à un QJM de 8.19 m³/s en sus de l'opération de contrôle sur le réseau de référence.

Comme l'ensemble des Perlidae, Dinocras possède un cycle de vie semi-voltin, il faut environ 3 ans aux larves pour émerger et donc atteindre la maturité sexuelle. De ce fait, dans des conditions stables, des larves de tout âge sont présentes dans le milieu et peuvent être prélevées.

Mode opératoire :

Une répétition de 20 micro-prélèvements aléatoires, effectués à l'aide d'un surber (la période d'étiage permet l'utilisation de cet appareil). La détermination se fait à l'œil nu et à l'aide d'une loupe de terrain.

Résultats :

Aucun individu n'a été retrouvé sur l'ensemble des 32 (20+12) micro-prélèvements ôtant ainsi le doute d'une présence non observée à cause d'un trop faible effort d'échantillonnage ou d'un échantillonnage orienté.

Limite de cette opération :

La prospection d'imagos n'a pas été réalisée. De plus le domaine vital d'une population de Dinocras cephalotes ou d'autres Perlidae, étant bien plus étendu qu'une simple station hydrobiologique de 3500m², ne permet pas de conclure avec certitude de la disparition de Dinocras de la Sorgue. Cependant, cette rivière emblématique fait l'objet de nombreuses études réglementaires ou pédagogiques (SMBS, MRE, IRSTEA/Université d'Avignon, ONEMA...) sur diverses stations mais aucun Perlidae n'a plus été retrouvé depuis le début des années 2000.

Quoi qu'il en soit, la diminution vertigineuse des effectifs, jusqu'à la probable extinction de cette population vaclusienne, est un fait non négligeable qui ne pourrait être imputé à un facteur unique mais certainement à une somme de facteurs. Les causes de l'augmentation visible de la conductivité n'ont-elles pas provoquées aussi d'autres augmentations non perçues par les méthodes d'évaluations de l'époque ?

En somme, les changements de méthodes d'évaluations de la qualité des eaux, la diversification des polluants chimiques, les connaissances limitées de l'écologie des imagos (symbiose, commensalisme, parasitisme, exclusion réciproque...) ne permettent pas d'avoir une vision précise sur les causes létales de cette espèce.

L'isolement géographique de la Sorgue, laisse présager un sombre avenir pour les espèces polluo-sensibles. En effet, suite à un événement perturbateur majeur, si un taxon ne possède par les traits de résistance adéquats, la possibilité de recolonisation des habitats par des individus venant de l'amont sera nulle. Seules les espèces tolérantes, ubiquistes, de stratégie r, bénéficiant des traits offrant une grande résilience, se maintiendront. Les espèces orophiles ayant trouvé refuge dans cette rivière (Guidicelli, Olivari 2010), elles, disparaîtront.

Annexe 6 : Evolution des traits des communautés

Sont différenciés ici 11 traits faisant références aux affinités des taxons vis-à-vis du biotope (dénommés ici traits ou variables écologiques), de 11 traits faisant références aux caractéristiques biologiques et comportementales des taxons (dénommés ici traits ou variables biologiques).

Chaque variable comporte différentes possibilités appelées ici modalités.

Tachet propose ainsi un codage flou (coefficient) correspondant aux affinités du taxon pour les modalités (« 0 » indiquant une absence d'affinité, « 1 » une affinité faible, « 2 » une affinité moyenne et « 3 » ou « >3 » une forte affinité.

Pour l'ensemble des taxons, une pondération du codage numérique des modalités est faite de façon à ce que le poids en terme d'information soit le même pour tous les taxons pour un trait donné ; c'est-à-dire que la somme des valeurs de codages des modalités d'un trait soit la même pour tous les taxons, ce qui n'est pas le cas dans le « Tachet ». Ainsi plus de poids est donné aux taxons qui ont une variabilité de modalité faible dans un trait donné.¹³

Une règle de 3 est appliquée pour calculer ce coefficient pondéré :

$$\frac{\text{Coefficient de la modalité} \times \text{Nombre de modalités du trait}}{\text{Somme des coefficients de l'ensemble des modalités du trait}}$$

Ensuite, le calcul de la fréquence de chaque modalité est réalisé par la multiplication des abondances des taxons présents (*abondance réduite en log et elle-même pondérée suivant le groupe d'abondance du taxon, de façon à donner un peu plus de poids aux taxons naturellement peu abondants et qui sont souvent de bons indicateurs de l'état du milieu*) avec le coefficient pondéré des modalités de chaque trait. La somme des codages produits obtenus est effectuée pour chaque modalité et répartie en termes de fréquence pour chaque trait.

Ainsi, pour un prélèvement donné est affectée la proportion d'affinité de chaque modalité pour chaque trait.

1 Etude des compositions faunistiques à travers les traits écologiques

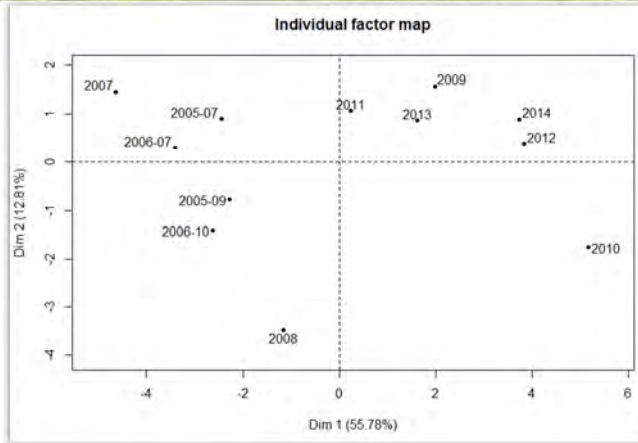
Voici la liste des 11 traits écologiques et quelques exemples de modalités :

Température : - sténotherme psychrophile (<15°C)
- sténotherme thermophile (>15°C)
- eurytherme

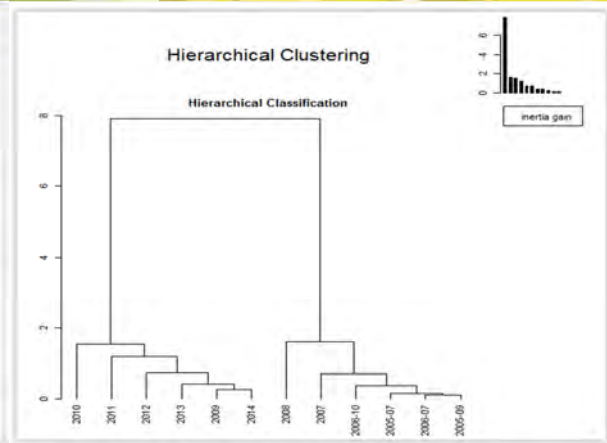
Salinité : - eau douce
- eau saumâtre

pH, Degré de trophie, Valeur saprobiale, Régions géographiques, Altitude, Distribution longitudinale – Zonation, /Distribution transversale, Microhabitats – Substrats, Courant (vitesse)

¹³ Fabrice Parais DREAL Basse-Normandie



Nuage des individus de l'AFM



Classification hiérarchique ascendante de l'AFM

L'axe 1 (55.78% d'inertie) du nuage des individus de l'AFM correspond au gradient longitudinal aval-amont d'un cours d'eau. Il marque une fracture chronologique séparant ainsi les prélèvements anciens (avant 2009) des récents (depuis 2009).

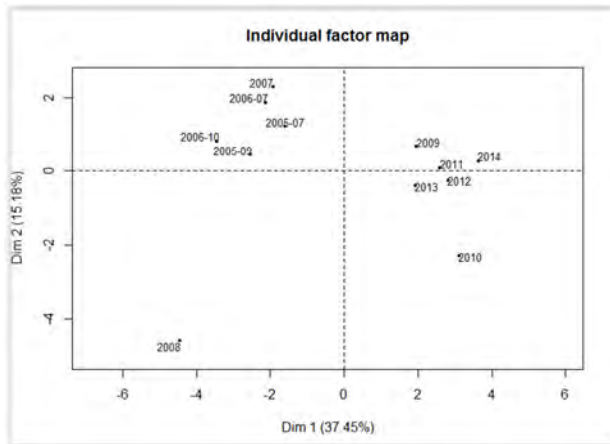
L'axe 1 du cercle des corrélations renseigne de ce fait sur les modalités vers lesquelles tend chaque période :

Variabiles écologiques	2005-2008	2009-2014
Salinité	eau saumâtre	eau douce
Température	eurytherme	psychrophile
Altitude	plaine collinéen	montagnard - alpin
Degré de trophie	mesotrophe - eutrophe	oligotrophe
Distribution transversale	étang, mare, méandre abandonnés	chenal de rivière
Valeur saprobiale	alpha-mesosaprobe	xéno - oligosaprobe
Zones géographiques	basses terres	alpes - pyrénées
Vitesse eau	lent - nul	rapide - moyen
Zonation	e-pi-metapotamon	e-pi-meta-hyporhithron
Substrat préférendum	macrophytes, algues	blocs, pierres

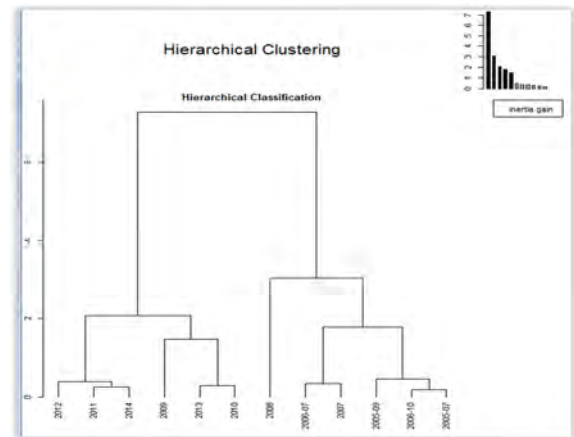
Cette évolution (visible dans la classification) décrit une amélioration du peuplement dont les affinités vis-à-vis des variables écologiques s'orientent vers des modalités caractérisant une rivière de tête de bassin versant plus en adéquation avec la Sorgue amont.

En ce qui concerne l'axe 2 (12.81% de l'inertie), 2008 se différencie des autres années d'étude par son trait substrat dont la modalité sable est plus importante, ainsi que la modalité du pH 4 à 4.5 dont il prend des valeurs plus faibles.

Cette différenciation est la résultante de l'instabilité hydrologique qu'a subie le prélèvement de novembre 2008. En effet, la crue de 50 m³/s de début novembre se reflète sur le cortège faunistique.



Nuage des individus de l'AFM



Classification hiérarchique ascendante de l'AFM

Tout comme pour les traits écologiques, l'AFM sur les traits biologiques fait ressortir, *via* son axe 1 (37.5% de l'inertie), une distinction chronologique nette entre les peuplements.

Le cercle des corrélations renseigne ainsi sur les modalités vers lesquelles tend chaque période :

Variables écologiques	2005-2008	2009-2014
Mode de dispersion	aquatique passive	aérienne active - aérienne passive
Forme de résistance	diapause	aucune
Age	supérieur à 1 an	inférieur ou égal à 1 an
Vie aquatique	adulte - oeuf	larve -nymphé
Taille	2.5 à 5 - 40 à 80	5 à 10
Mode de locomotion	rampant - fouisseur épibenthique	fixation temporaire / permanente
Reproduction	ovoviviparité	oeufs isolés libres / fixes
Mode d'alimentation	broyeurs -	mangeurs de sédiments fins - prédateurs

Le prélèvement tardif du 19 novembre 2008 se distingue à nouveau sur l'axe 2 par une plus forte proportion de taxons réalisant des pontes terrestres et une plus faible proportion de filtreurs. En cause ici aussi la crue du 7 novembre 2008. Les taxons réalisant des pontes terrestres étant moins impactés par ce facteur, à l'opposé, les filtreurs plus exposés au courant, ont vu leurs proportions baissées.

Conclusion de l'étude des traits bio-écologiques

L'ACM permet de visualiser 2 groupes différents de structures taxonomiques.

D'un côté le groupe de prélèvements de 2005 à 2007 caractérisés par des peuplements de potamon et d'un autre côté, les prélèvements de 2009 à 2014 caractérisés eux par des peuplements de rhitron. Par ailleurs, le prélèvement de 2008 ressort comme atypique.

Annexe 7 : Abréviation et contribution des modalités des traits

CS1	CS2		
0,057	-0,020	Ta1	Taille 2.5 a 5
-0,106	-0,207	Ta2	Taille 5 a 10
-0,056	0,219	Ta3	Taille 10 a 20
0,065	0,060	Ta4	Taille 20 a 40
0,113	-0,055	Ta5	Taille 40 a 80
0,037	0,067	Ta6	Taille > 80
-0,082	-0,191	A1	Age inferieur ou egal 1 an
0,082	0,191	A2	Age superieur 1 an
-0,011	0,053	Gen0	Nb. gene inferieur 1/an
0,062	-0,018	Gen1	Nb. gene 1 par na
-0,055	-0,003	Gen2	Nb. gene superieur 1/an
0,091	-0,051	Vie1	Vie aquatiqueoeuf
-0,119	0,050	Vie2	Vie aquatique larve
-0,130	-0,046	Vie3	Vie aquatique nymphe
0,164	0,023	Vie4	Vie aquatique adulte
0,057	0,138	R1	Reproduction ovoviviparite + soins jeunes
-0,056	-0,095	R2	Reproduction oeufs isoles libres
-0,017	-0,167	R3	Reproduction oeufs isoles fixes
0,007	-0,022	R4	Reproduction pontes cimentees ou fixees
0,011	-0,066	R5	Reproduction pontes libres
0,036	-0,101	R6	Reproduction pontes endophytiques
-0,062	0,117	R7	Reproduction pontes terrestres
-0,008	0,065	R8	Reproduction reproduction asexuee
0,100	0,092	D1	Dispersion aquatique passive
0,019	-0,062	D2	Dispersion aquatique active
0,002	-0,107	D3	Dispersion aerienne passive
-0,110	0,048	D4	Dispersion aerienne active
0,006	-0,079	F1	Forme resistanceoeufs gemmules statoblastes coques
0,002	0,025	F2	Forme resistance cocons
0,149	-0,014	F3	Forme resistance logettes contre dessiccation
0,071	-0,023	F4	Forme resistance diapause ou quiescence
-0,044	0,022	F5	Forme resistance aucune
-0,009	0,097	N1	Nourriture sediment fins + microorganisme
-0,004	-0,022	N2	Nourriture debris < 1 mm
0,003	0,051	N3	Nourriture debris vegetaux > 1 mm
-0,089	0,020	N4	Nourriture microphytes vivants
0,057	-0,068	N5	Nourriture macrophytes vivants
0,038	0,022	N6	Nourriture animaux morts < 1 mm
0,003	-0,042	N7	Nourriture microinvertebres vivants
-0,020	0,033	N8	Nourriture macroinvertebres vivants
0,137	-0,079	N9	Nourriture vertebres
0,000	0,075	M1	Mode d'alimentation absorpction a travers les teguments
-0,086	0,018	M2	Mode d'alimentation mangeur de sediments fins
0,031	0,104	M3	Mode d'alimentation broyeur
-0,061	-0,038	M4	Mode d'alimentation racleur brouteur

0,071	-0,107	M5	Mode d'alimentation filtreurs
0,139	-0,158	M6	Mode d'alimentation perceurs alvivoire ou predateur suceur
-0,043	0,070	M7	Mode d'alimentation predateur decoupeur ou avaleur
0,092	-0,030	M8	Mode d'alimentation parasite
0,029	-0,061	Res1	Respiration teguments
-0,020	0,149	Res2	Respiration branchies
0,004	0,012	Res3	Respiration plastron
-0,036	-0,232	Res4	Respiration stigmates respiration aerienne
-0,118	0,026	T1	T stenotherme psychrophile < 15C
-0,081	-0,186	T2	T stenotherme thermophile > 15C
0,146	0,075	T3	T eurytherme
0,037	0,017	pH1	pH > 4
0,092	0,033	pH2	pH 4 a 4.5
0,082	-0,003	pH3	pH 4.5 a 5
0,002	-0,015	pH4	pH 5 a 5.5
-0,081	0,044	pH5	pH 5.5 a 6
-0,017	-0,035	pH6	pH > 6
-0,115	0,022	Tr1	Trophie oligotrophe
0,097	-0,028	Tr2	Trophie mesotrophe
0,076	-0,006	Tr3	Trophie eutrophe
-0,167	-0,041	V1	Valeur saprobiale xenosaprobe
-0,133	0,007	V2	Valeur saprobiale oligosaprobe
0,106	-0,125	V3	Valeur saprobiale beta mesosaprobe
0,153	0,027	V4	Valeur saprobiale alpha mesosaprobe
0,028	0,095	V5	Valeur saprobiale poly saprobe
-0,129	0,042	S1	Sel eau douce
0,117	-0,080	S2	Sel eau saumatre
-0,147	-0,050	Z1	Zones biologiques 2: Pyrennees
-0,137	0,097	Z2	Zones biologiques 4: Alpes Jura
-0,034	0,053	Z3	Zones biologiques 8: Massif Central et Vosges
0,139	0,018	Z4	Zones biologiques 13a: basses terres (oceaniques)
0,092	-0,068	Z5	Zones biologiques 13b: basses terres (mediterraneennes)
0,154	-0,082	A11	Altitude plaine + collineen (< 1000m)
-0,145	0,081	A12	Altitude montagnard (1000 a 2000 m)
-0,103	0,052	A13	Altitude alpin (>2000m)
-0,033	0,212	D11	Distribution longitudinale crenon
-0,134	0,146	D12	Distribution longitudinale epirhithron
-0,071	0,065	D13	Distribution longitudinale metarhithron
-0,107	0,037	D14	Distribution longitudinale hyporhithron
0,106	-0,136	D15	Distribution longitudinale epipotamon
0,129	-0,084	D16	Distribution longitudinale metapotamon
-0,026	-0,099	D17	Distribution longitudinale estuaire
0,158	-0,148	D18	Distribution longitudinale hors hydrosysteme fluviale
-0,163	-0,020	Dt1	Distribution transversale chenal de riviere
0,036	0,038	Dt2	Distribution transversale rives chenaux secondaires
0,179	0,090	Dt3	Distribution transversale etangs mares meandres abandonnes
0,047	0,086	Dt4	Distribution transversale marais tourbieres
0,099	-0,030	Dt5	Distribution transversale eaux temporaires

-0,025	-0,165	Dt6	Distribution transversale lacs
-0,013	0,048	Dt7	Distribution transversale habitats souterrains
-0,156	-0,123	Mh1	Microhabitats preferendum dalles blocs pierres gallets
-0,061	-0,045	Mh2	Microhabitats preferendum graviers
-0,081	0,126	Mh3	Microhabitats preferendum sables
0,019	0,152	Mh4	Microhabitats preferendum limon
0,169	-0,063	Mh5	Microhabitats preferendum macrophytes algues filamenteuses
0,078	0,073	Mh6	Microhabitats preferendum microphytes
-0,011	-0,111	Mh7	Microhabitats preferendum branches racines
0,018	0,094	Mh8	Microhabitats preferendum litières
0,147	0,091	Mh9	Microhabitats preferendum vases
0,004	0,016	Mo1	Mode de locomotion vol
0,108	0,093	Mo2	Mode de locomotion nageur en surface
-0,053	0,090	Mo3	Mode de locomotion nageur en pleine eau
0,058	0,060	Mo4	Mode de locomotion rampant
0,053	0,018	Mo5	Mode de locomotion fouisseur epibenthique
-0,046	0,137	Mo6	Mode de locomotion endobenthique (interstitiel)
-0,068	-0,246	Mo7	Mode de locomotion fixation temporaire
-0,133	-0,044	Mo8	Mode de locomotion fixation permanente
0,196	0,121	Vi1	Vitesse eau nul
0,099	-0,013	Vi2	Vitesse eau lent (<25 cm/s)
-0,138	-0,006	Vi3	Vitesse eau moyen (25 a 50 cm/s)
-0,191	-0,132	Vi4	Vitesse eau rapide (> 50 cm/s)

Annexe 8 : Tableau récapitulatif des dénombrements de taxons pour chaque prélèvement d'invertébrés de la Sorgue à Fontaine de Vaucluse 06123700 depuis 2005

	69	183	191	200	231	241	245	292	305	320	322	339	364	404	421	450	481	502	618	619	622	623	625	636
200507	51	13	0	0	3	1	3	2	0	2	7	31	225	2	0	283	0	3	329	16	0	154	85	1
200509	27	18	3	2	12	0	2	6	1	0	5	56	208	4	1	0	0	0	157	415	5	44	21	0
200607	33	24	3	2	5	0	0	4	0	17	8	30	667	1	0	70	0	2	423	7	11	116	143	0
200610	21	18	5	0	6	0	1	5	0	0	0	55	376	0	3	5	0	3	168	91	0	26	36	2
2007	19	7	0	2	4	4	0	1	0	5	1	11	746	3	0	162	0	1	158	3	2	147	62	0
2008	0	5	15	0	2	0	0	9	1	1	2	50	75	2	2	0	1	0	36	28	4	10	29	5
2009	49	45	13	0	0	0	17	13	2	1	17	28	1086	22	0	6	1	2	42	7	0	126	16	0
2010	41	66	246	0	0	0	22	28	2	0	5	141	908	61	5	4	0	0	141	33	0	221	35	0
2011	204	40	45	3	0	23	21	19	5	0	12	50	132	38	9	15	2	1	172	30	0	281	86	0
2012	72	7	46	1	0	0	62	10	10	0	7	45	533	6	0	11	0	0	95	19	1	97	7	0
2013	25	36	71	1	0	1	59	1	2	0	1	17	283	34	0	31	0	2	212	16	0	82	59	0
2014	64	22	214	1	9	0	48	30	1	0	5	62	189	136	1	1	0	0	162	10	0	148	58	0
	757	783	801	807	831	837	880	892	906	908	918	928	933	967	972	973	1004	1009	1028	1042	1061	1071	3111	3163
200507	2	0	303	138	0	0	1	2791	3	97	3	3	354	63	3	366	17	150	17	23	190	1	2	2
200509	3	1	700	513	0	0	14	5973	3	25	7	8	121	51	4	1556	33	305	12	6	58	2	0	17
200607	0	0	557	253	3	0	8	7355	3	142	5	8	265	52	505	1026	25	199	8	14	202	5	0	3
200610	0	0	94	41	1	0	3	3142	3	69	4	4	261	36	11	637	251	181	5	8	113	0	1	6
2007	0	2	410	455	4	1	1	5076	3	73	4	1	155	6	112	1541	8	189	1	14	311	4	0	3
2008	1	0	0	9	1	0	7	2250	3	2	1	1	288	12	1	273	98	28	0	11	90	0	0	18
2009	0	0	94	839	11	0	2	5034	3	8	1	1	70	3	1	440	12	1	0	7	93	7	3	0
2010	1	0	230	596	21	0	2	7267	3	0	0	1	209	8	2	513	7	1	7	0	252	0	0	0
2011	0	0	155	2005	5	1	3	11406	3	6	2	1	368	144	207	688	96	4	93	0	627	7	0	1
2012	4	0	783	129	4	1	0	5055	3	0	7	0	113	180	1	473	3	4	12	1	183	2	0	6
2013	2	1	58	64	4	1	0	10492	3	6	0	0	186	118	19	290	4	7	11	0	62	1	1	4
2014	0	0	32	144	7	1	0	3942	3	1	1	5	50	58	0	211	11	0	7	6	73	3	1	2
69	Leuctra	Leuctridae			404	Rhithrogena	Heptageniidae			783	Psychodidae	Psychodidae				986	Non pris en compte							
183	Rhyacophila	Rhyacophilidae			421	Ecdyonurus	Heptageniidae			801	Simuliidae	Simuliidae				992	Bythinella							
189	Glossosomatidae	Glossosomatidae			443	Heptagenia	Heptageniidae			807	Chironomidae	Chironomidae				999	Lymnaea							
190	Glossosoma	Glossosomatidae			450	Ephemerella	Ephemeroptera			819	Ceratopogonidae	Ceratopogonidae				1004	Radix							
191	Agapetus	Glossosomatidae			457	Caenis	Caenidae			831	Empididae	Empididae				1009	Planorbidae							
200	Hydroptila	Hydroptilidae			481	Paraleptophlebia	Leptophlebiidae			837	Tabanidae	Tabanidae				1028	Ancylus							
202	Allotrichia	Hydroptilidae			502	Ephemera	Ephemeroptera			847	Anthomyidae	Anthomyidae				1043	Pisidium							
231	Polycentropus	Polycentropodidae			515	Orectochilus	Gyrinidae			880	Asellidae	Asellidae				1044	Sphaerium							
241	Lype	Psychomyidae			613	Dryops	Dryopidae			892	Gammarus	Gammaridae				1055	Dugesidae							
245	Tinodes	Psychomyidae			617	Stenelmis	Elmidae			902	Niphargus	Niphargidae				1061	Planariidae							
276	Limnephilidae	Limnephilidae			618	Elmis	Elmidae			906	HYDRACARIENS	HYDRACARIENS				1071	Dendrocoelidae							
286	Goeridae	Goeridae			619	Esolus	Elmidae			908	Glossiphoniidae	Glossiphoniidae				2517	sF. Hydrophilinae							
289	Lithax	Goeridae			622	Oulimnius	Elmidae			918	Piscicolidae	Piscicolidae				3111	NEMATHELMINTHA							
292	Silo	Goeridae			623	Limnius	Elmidae			928	Erpobdellidae	Erpobdellidae				3131	Non pris en compte							
305	Lepidostoma	Lepidostomatidae			625	Riolus	Elmidae			933	OLIGOCHAETA	OLIGOCHAETA				3163	Limnephilinae							
310	Leptoceridae	Leptoceridae			636	Helodes	Helodiidae = Scirtidae			967	Theodoxus	Neritidae				3168	HYDROZOA							
320	Adicella	Leptoceridae			637	Hydrocyphon	Helodiidae = Scirtidae			972	Valvata	Valvatidae				3170	OSTRACODA							
322	Sericostoma	Sericostomatidae			650	Calopteryx	Calopterygidae			973	Hydrobiidae	Hydrobiidae				3181	Electrogena							
339	Odontocerum	Odontoceridae			743	Veliidae	Veliidae			978	Potamopyrgus	Hydrobiidae												
364	Baetis	Baetidae			757	Limoniidae	Limoniidae			982	Belgrandia	Hydrobiidae												