HAL open science

Histoire du suivi de l'Arve et de son bassin versant : Etude du réseau de surveillance et évolution des contaminants dans les sédiments

Olivier Trigo

To cite this version:

Olivier Trigo. Histoire du suivi de l'Arve et de son bassin versant : Etude du réseau de surveillance et évolution des contaminants dans les sédiments. Sciences de l'environnement. 2020. hal-03671479

HAL Id: hal-03671479

https://hal.inrae.fr/hal-03671479v1

Submitted on 18 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2019-2020

Voie d'approfondissement :
Cours d'eau littoral et voies navigables

Soutenu le 4 septembre 2020

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Bernard Clément
- Maître de TFE : Marina Coquery & Brice Mourier
- Expert : Véronique Gouy

Par

Olivier Trigo

Histoire du suivi de l'Arve et de son bassin versant : Etude du réseau de surveillance et évolution des contaminants dans les sédiments

Organisme d'accueil

INRAE

Notice analytique

AUTEUR	
Nom	Trigo
Prénom	Olivier
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	INRAE à Villeurbanne
Nom du Tuteur	Marina Coquery & Brice Mourier
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	Histoire du suivi de l'Arve et de son bassin versant : étude du réseau de surveillance et évolution des contaminants dans les sédiments
Titre (anglais)	History of monitoring the Arve and its watershed: study of the monitoring network and Évolution of contaminants in sediments
Résumé (français)	Ce rapport décrit le réseau de surveillance de qualité de l'eau du bassin versant de l'Arve ainsi que son évolution dans le temps. Il s'appuie essentiellement sur les données issues du site Naïades de l'OFB. Il fait également le point sur l'état chimique de la qualité de l'Arve concernant les éléments traces métalliques et les hydrocarbures aromatiques polycycliques à partir des données de sédiments de surface. Un outil statistique, Hype, mis au point par le BRGM est utilisé afin d'appuyer l'analyse de données et faire ressortir les grandes tendances temporelles et les éventuels points de ruptures. Enfin, les sources principales de contamination sont dégagées ainsi que les causes possibles, à la baisse comme à la hausse, des tendances et ruptures dans les concentrations de polluants dans les sédiments.

Résumé (anglais)	This report describe the quality water monitoring network in the Arve watershed and its developpement over time. It is essentially based on data from Naïades site, managed by the OFB. He also provided an update on the Arve status about trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons based on surface sediment data. A statistical instrument, Hype, developped by BRGM is used to support data analysis and show the major temporal trends and the possible points of failure. Finally, the main sources of contamination are highlighted along with the potential causes, both downward and upward, of trends and disruptions in concentrations of pollutants in sediments.		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Réseau de mesure, station de prélèvement, polluant, HAP, ETM, sédiments, bryophytes, station d'épuration		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Measuring network, sampling station, pollutant, PAH, MTO, sediment, bryophytes, treatment plant		
Termes géo-graphique (français)	Bassin versant, rivière, exutoire, confluence, topographie		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	109	19 (33 pages)	43

Sommaire

Notice analytique 2

Sommaire 4

Liste des illustrations 6

Liste des tableaux 9

Introduction 10

1 L'Arve et son bassin versant 12

1.1 Géographie physique de l'Arve et de son bassin versant 12

1.2 Les influences anthropiques sur l'Arve 14

2 MATERIEL ET METHODES 18

2.1 L'origine des données 18

2.2 Évaluation des tendances temporelles de contamination à l'aide de l'outil Hype 22

2.2.1 Présentation de Hype 22

2.2.2 Les étapes 23

2.2.3 Les tests statistiques réalisés par Hype 23

2.2.4 La correction des données 24

2.2.5 Les limites de Hype 25

3 RESULTATS ET DISCUSSION 26

3.1 Évolution du réseau de surveillance des pollutions aquatiques dans le bassin versant de l'Arve 26

3.1.1 Évolution du suivi dans le temps 26

3.1.2 Un réseau disparate : un bassin versant inégalement suivi géographiquement et quantitativement 29

3.1.3 L'état des cours d'eau : suivi de l'eau et autres supports 33

3.1.4 Analyse de la pression anthropique du bassin versant de l'Arve 36

3.1.5 La mise en place progressive d'infrastructures de gestion de l'eau 38

3.2 Les sédiments : témoins d'une évolution positive de l'Arve ? 41

3.2.1 Le choix des stations 42

3.2.2 Les paramètres étudiés 44

3.3 Exploitation des données et analyses 46

3.3.1 Les éléments traces métalliques 46

3.3.2 La situation avant 1998 des éléments traces métalliques dans l'Arve 58

3.3.3 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques 62

4 CONCLUSION GENERALE 70

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 72

Annexes 75

Liste des illustrations

FIGURE 1 : TOPOGRAPHIE DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE – VUE DE L'ENSEMBLE FRANCO-SUISSE (MELO ET AL. 2015). 12
FIGURE 2 : LE BASSIN VERSANT DE L'ARVE ET ECOULEMENTS MENSUELS (DEBIT MOYEN MENSUEL) 13
FIGURE 3 : CARTE DE L'OCCUPATION DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'ARVE (D'APRES LES DONNEES DE CORINE LAND COVER 2012) 16
FIGURE 4 : OCCUPATION DES SOLS SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT ET A PROXIMITE DE L'ARVE 17
FIGURE 5 : CARTE DES 188 STATIONS DE MESURE DE LA QUALITE DES EAUX UTILISEES DEPUIS 1971 SUR LE BASSIN DE L'ARVE (DONNEES EXTRAITES DE NAÏADES) 21
FIGURE 6 : NOMBRE DE STATIONS CONTROLEES CHAQUE ANNEE ET NOMBRE MOYEN DE PRELEVEMENT PAR STATIONS CONTROLEES UNE ANNEE DONNEE 27
FIGURE 7 : NOMBRE DE NOUVEAUX PARAMETRES SUIVIS PAR SUPPORT ET PAR ANNEE DE 1971 A 2018, SUR LE BASSIN DE L'ARVE 28
FIGURE 8 : NOMBRE DE STATIONS SUIVIES PAR ANNEES POUR LES DIFFERENTS PRODUCTEURS DE DONNEES DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 29
FIGURE 9 : CARTE DES PRINCIPALES STATIONS DE SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU DANS LE BASSIN VERSANT DE L'ARVE (13 STATIONS AVEC > 60 PRELEVEMENTS SUR LA PERIODE 1971-2019, DONT 7 STATIONS SUR L'ARVE, ET UNE SUR L'AIRE, LE BORNE, LE FORON, LE GRAND FORON, LE GIFFRE ET LA MENOGE) 30
FIGURE 10 : CARTES DES STATIONS DE PRELEVEMENTS DES SEDIMENTS ET DES BRYOPHYTES ET INDICATEUR SUR LE NOMBRE DE PRELEVEMENTS 35
FIGURE 11 : TERRITOIRES DU BASSIN DE L'ARVE LES PLUS EXPOSES AUX POLLUTIONS D'ORIGINE ANTHROPIQUE. D'APRES LA DENSITE DE POPULATION, DE SITES ICPE, BASOL ET BASIAS 37
FIGURE 12 : DENSITE DES COMMUNES DU BASSIN VERSANT FRANÇAIS DE L'ARVE D'APRES LES DONNEES INSEE DE 2017 38
FIGURE 13 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE STEP DANS LE BASSIN VERSANT DE L'ARVE FRANÇAIS 38
FIGURE 14 : COMPARAISON CAPACITES DES STEPS DU BASSIN VERSANT ET NOMBRE D'HABITANTS 39
FIGURE 15 : COMPARAISON CAPACITE DES STEP ET POPULATION DE LEUR AGGLOMERATION 40
FIGURE 16 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN PHOSPHORE ET DBO5 DANS LES EAUX DE SURFACE A LA STATION DE PONT-NOTRE-DAME A ARTHAZ 41
FIGURE 17 : POURCENTAGE DES PRELEVEMENTS SEDIMENTAIRES SELON LE MOIS DE L'ANNEE 42
FIGURE 18 : CARTE DES STATIONS PRINCIPALES UTILISEES POUR L'ETUDE SUR L'EVOLUTION DE LA POLLUTION DES SEDIMENTS DE L'ARVE 43
FIGURE 19 : EXEMPLE DE RESULTATS PRODUITS PAR HYPE, LE PLOMB A LA STATION DES HOUCHES 47

FIGURE 20 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN ARSENIC DANS LE BASSIN VERSANT DE L'ARVE, COMPARAISON DES PRINCIPALES STATIONS 49
FIGURE 21 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN CADMIUM, COMPARAISON DES STATIONS PRINCIPALES DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 50
FIGURE 22 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN CHROME, COMPARAISON DES STATIONS PRINCIPALES DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 51
FIGURE 23 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN CUIVRE, COMPARAISON DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 52
FIGURE 24 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN MERCURE, COMPARAISON DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 53
FIGURE 25 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN NICKEL, COMPARAISON DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 54
FIGURE 26 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN PLOMB, COMPARAISON DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 55
FIGURE 27 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN ZINC, COMPARAISON DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 56
FIGURE 28 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN MERCURE DANS LES BRYOPHYTES ENTRE LES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 60
FIGURE 29 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN CADMIUM DANS LES BRYOPHYTES, DANS LES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 61
FIGURE 30 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN FLUORANTHENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 63
FIGURE 31 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN BENZO(A)PYRENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 64
FIGURE 32 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN DIBENZO(A,H)ANTHRACENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 65
FIGURE 33 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DANS LE TEMPS DES HAP DANS LES SEDIMENTS A MAGLAND 66
FIGURE 34 : RAPPORT ENTRE HAP, INDICATEURS DE L'ORIGINE DES HAP POUR LES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 68
FIGURE 35 : OCCUPATION DES SOLS AUX ABORDS DE L'ARVE (SOURCE CORINE LAND COVER) 76
FIGURE 36 : CARTE DES STEPS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE (SOURCE : DATA.GOUV.FR) 77
FIGURE 37 : ARVE A ARTHAZ PONT-NOTRE-DAME / PHOSPHORE TOTAL 78
FIGURE 38 : ARVE A ARTHAZ PONT-NOTRE-DAME / DBO5 79
FIGURE 39 : CARTE DES VALEURS MOYENNES EN CD PAR PETITES REGIONS AGRICOLES PROGRAMME ADEME/INRA 81
FIGURE 40 : STRUCTURE DES HAP, EXEMPLE DU NAPHTALENE ET DU BENZO(B)FLUORANTHENE 82
FIGURE 41 : CARTE DES CONCENTRATIONS EN PCB INDICATEURS - MAXIMA PAR STATION SUR LA PERIODE 2006-2011 (SOMME DE 77 CONGENERES) (NOARS AND BOURG, 2013) 83

FIGURE 42 : CARTE DES CONCENTRATIONS EN HAP - MAXIMA PAR STATION SUR LA PERIODE 2006-2011 (SOMME DE 8 COMPOSES) (NOARS AND BOURG, 2013) 84
FIGURE 43 : RATIOS DE DIAGNOSTICS UTILISES POUR L'ESTIMATION DES SOURCES DE HAP D'APRES (POULIER ET AL., N.D.) 89
FIGURE 44 : RESULTATS DE LA NORMALISATION POUR LE NICKEL, LE PLOMB ET LE ZINC 92
FIGURE 45 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN ARSENIC DANS LES BRYOPHYTES DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 93
FIGURE 46 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN CHROME DANS LES BRYOPHYTES DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 94
FIGURE 47 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN CUIVRE DANS LES BRYOPHYTES DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 95
FIGURE 48 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN NICKEL DANS LES BRYOPHYTES DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 96
FIGURE 49 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN PLOMB DANS LES BRYOPHYTES DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 97
FIGURE 50 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATION EN ZINC DANS LES BRYOPHYTES DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 98
FIGURE 51 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN NAPHTALENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 99
FIGURE 52 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN PHENANTHRENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 100
FIGURE 53 : COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN ANTHRACENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 101
FIGURE 54 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN PYRENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 102
FIGURE 55 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN BENZO(A)ANTHRACENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 103
FIGURE 56 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN CHRYSENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 104
FIGURE 57 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN BENZO(K)FLUORANTHENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 105
FIGURE 58 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN BENZO(GHI)PERYLENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 106
FIGURE 59 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN BENZO(B)FLUORANTHENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 107
FIGURE 60 : ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES CONCENTRATIONS EN INDENO(1,2,3-CD)PYRENE DANS LES SEDIMENTS DES PRINCIPALES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 108

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : ÉVOLUTION DE LA POPULATION DE LA VALLEE DE L'ARVE SELON LES DONNEES INSEE DE 1968 A 2016 15
TABLEAU 2 : OCCUPATION DU SOL DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE D'APRES LES DONNEES CORINE LAND COVER DE 2012 17
TABLEAU 3 : QUALITE DU SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU DES COURS D'EAU DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE DE PLUS DE 10KMS DE LONG (INDICATEURS CALCULES A PARTIR DU NOMBRE DE STATIONS ET DE JOURS/ANNEES DE PRELEVEMENT ET DE LA LONGUEUR DES COURS D'EAU) DEPUIS 1971 33
TABLEAU 4 : REPARTITION DES NOTES SELON LES "DENSITES" CALCULEES POUR CHAQUE COMMUNE DU BASSIN DE L'ARVE A PARTIR DES DONNEES DE POPULATION, NOMBRE D'ICPE, SITE BASOL, SITE BASIAS. 36
TABLEAU 5 : LISTE DES STATIONS UTILISEES POUR L'ETUDE SUR L'EVOLUTION DE LA POLLUTION DES SEDIMENTS DE L'ARVE 43
TABLEAU 6 : SYNTHESE DES RESULTATS DE HYPE POUR L'EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN ETM DANS LES SEDIMENTS, DATE DE RUPTURE ET MOYENNES AVANT/APRES* 48
TABLEAU 7 : SYNTHESE DES RESULTATS DE HYPE SUR L'EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DES ETM DANS LES BRYOPHYTES, DATE DE RUPTURE ET MOYENNES AVANT/APRES* 59
TABLEAU 8 : SYNTHESE DES RESULTATS DE HYPE POUR L'EVOLUTION DES HAP DANS LES SEDIMENTS, DATE DE RUPTURE ET MOYENNES AVANT/APRES* 62
TABLEAU 9 : RESULTATS DU SUIVI DU PCB 101 A LA STATION DE MAGLAND DANS LES SEDIMENTS 80
TABLEAU 10 : NOMBRE DE STATIONS SELON LE NOMBRE DE JOURS DE PRELEVEMENTS 82
TABLEAU 11 : ABREVIATIONS DES COMPOSES HAP ET LEURS PRINCIPALES PROPRIETES* 85
TABLEAU 12 : CORRELATION ENTRE LES ETM ET LE FER AUX PRINCIPALES DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE 90

Introduction

Le cadre de cette étude porte sur l'Arve, qui est un des affluents du Haut-Rhône, qu'il rejoint en aval du lac Léman et dont la vallée jouit d'une image ambigüe. En effet, le bassin versant de l'Arve est à la fois perçu comme étant relativement préservé et comme un territoire soumis à une forte pression anthropique du fait d'une histoire industrielle ancienne où la pollution de l'air est bien connue et a largement fait débat (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017). Ce débat tourne en particulier autour de l'origine de cette pollution, imputée soit au trafic routier soit au chauffage au bois. Alors que les cours d'eau sont des milieux récepteurs des polluants d'un territoire, la qualité des eaux de ce bassin versant n'est pas perçue aussi négativement que celle de l'air, du moins les médias semblent y faire moins souvent référence. En effet, lors d'une recherche internet sur le moteur de recherche GOOGLE avec les mots clef « pollution Arve », le premier résultat ne concernant pas la qualité de l'air apparaît à la cinquième page.

Pour autant, l'absence de débat sur la question de la pollution de l'eau ne signifie pas que la problématique ne se pose pas. Avant de pouvoir conclure sur l'existence d'un problème de pollution de l'Arve il faut pouvoir poser un diagnostic à partir des données disponibles acquises notamment par les services de l'État à différentes échelles spatiale et temporelles. Quelle est la réalité du réseau de mesure du bassin versant de l'Arve et que peut-il nous apprendre sur l'état des cours d'eau ? De ce questionnement général, découlent plusieurs questions plus spécifiques auxquelles mon travail tentera d'apporter des réponses. Comment le réseau de surveillance de l'Arve a t-il évolué en parallèle des évolutions réglementaires et législatives qui se sont succédées depuis 1964 et la loi relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution (France, 1964) ? Peut-on déterminer le niveau de pollution des rivières du bassin versant de l'Arve et son évolution dans le temps depuis la mise en place du réseau de surveillance ? Peut-on relier évolution réglementaire, actions de l'Homme (mise en place d'un réseau d'assainissement, rejets de l'industrie…) et niveaux de pollution des eaux ?

Pour mener à bien cette étude, il a été nécessaire de collecter, traiter et analyser les données disponibles sur le suivi de qualité des eaux du bassin versant de l'Arve issues de la littérature scientifique et technique ou de bases de données institutionnelles. L'utilisation d'outils de calculs statistiques a permis d'approfondir l'analyse et mettre en forme les résultats obtenus quand l'utilisation de SIG a permis leur spatialisation. Dans l'étude des sédiments, quand cela a été possible, la normalisation des données a raffermi les comparaisons faîtes entre différents sites afin d'éliminer le biais lié à l'hétérogénéité des sédiments. En complément de ce travail, l'étude socio-environnementale du bassin versant et la localisation des pressions anthropiques a permis de mieux appréhender l'origine des polluants et de comprendre leur évolution dans le temps ainsi que les disparités relevées sur le territoire.

Dans une première partie, l'Arve et son bassin versant sont décrits. Cette description porte sur la géographie physique mais aussi sur les aspects socio-économique du territoire. Dans un second temps, ce sont les données utilisées dans ce rapport qui sont présentées, en particulier les données Naïades, ainsi que les outils comme Hype ou le test de Grubbs appliqués pour consolider et exploiter ces données. Enfin, une troisième partie permet de présenter les résultats de ce travail concernant l'évolution qualitative et quantitative dans le temps du réseau de suivi de la qualité des eaux et du réseau d'assainissement et d'analyser la pression anthropique qui s'exerce sur le territoire. C'est également dans la troisième partie que les données sédimentaires sont analysées concernant les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les éléments traces métalliques.

1 L'Arve et son bassin versant

1.1 Géographie physique de l'Arve et de son bassin versant

L'Arve a la particularité d'être une rivière transfrontalière puisqu'elle s'écoule en France, où elle prend sa source, et en Suisse, pays où elle conflue avec le Rhône quelques kilomètres à l'aval du lac Léman et de Genève (Figure 1). Elle nait dans le département de Haute Savoie, plus exactement dans le massif du Mont-Blanc au col de Balme à 2191m d'altitude. Entre sa source et son exutoire elle s'étend sur 108 km. La partie française accueille l'essentiel de son lit, son cours helvétique n'étant long que de 9 km environ ce qui représente moins de 10% de son linéaire total.

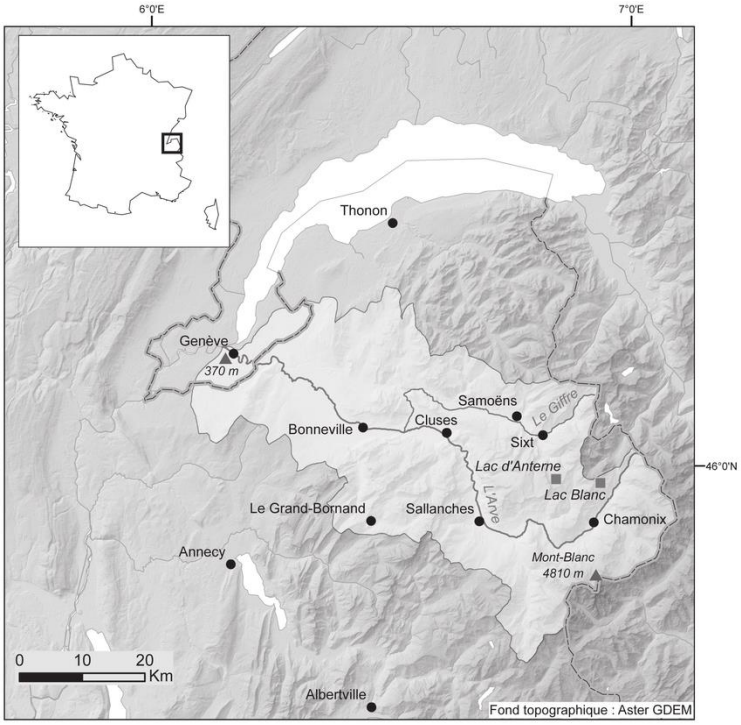
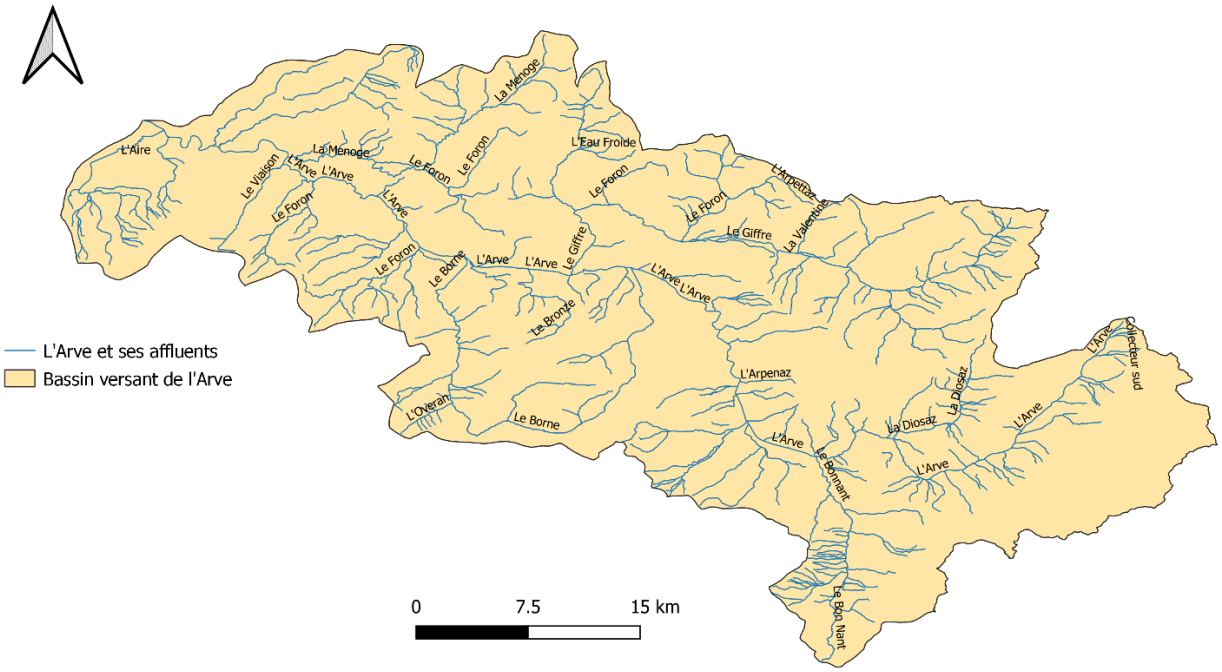


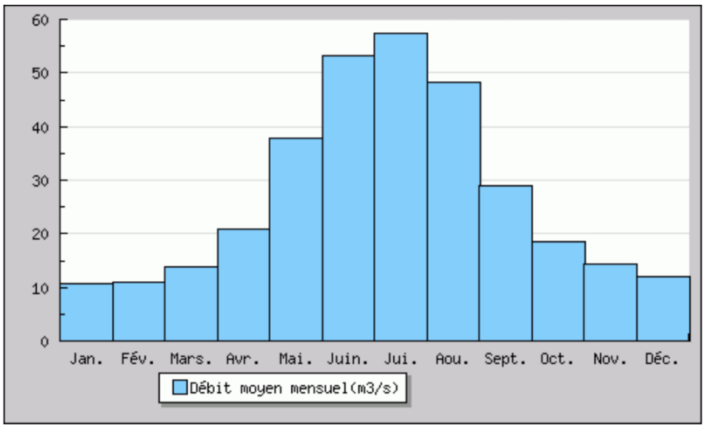
Figure 1 : Topographie du bassin versant de l'Arve – vue de l'ensemble franco-suisse (Mélo et al. 2015).

Son bassin versant, d'une superficie de 2079 km², se compose de plus de 300 affluents[1] allant de rus d'un kilomètre de longueur à des rivières comme le Giffre, le Borne et la Menoge qui dépassent les 30 kilomètres. Le tout forme un chevelu dense qui paraît propice à une bonne irrigation du territoire et bien réparti autour de la rivière principale.

[1] Sur le site SANDRE eau de France, 312 affluents sont référencés http://www.sandre.eaufrance.fr/geo/CoursEau/V0--0200

Bassin versant de l'Arve et de ses affluents





Débit moyen mensuel de l'Arve à la station de Sallanches (http://www.hydro.eaufrance.fr/presentation/procedure.php)

Figure 2 : Le bassin versant de l'Arve et écoulements mensuels (débit moyen mensuel)

Le régime hydrologique est d'influence glaciaire comme en témoigne la Figure 2. En effet la période d'étiage s'étend de la fin de l'Automne à l'Hiver (décembre à mars) et le maximum du débit moyen mensuel est atteint en l'été (juillet). Pour autant, compte tenu de l'importance du linéaire, l'Arve subit l'influence des cours d'eau qui l'alimentent et dont le régime dominant varie selon leur localisation. Ainsi le Syndicat Mixte d'aménagement de l'Arve et de ses abords (SM3A, 2018) distingue trois bassins :

- Un haut bassin au régime glaciaire
- Un bassin intermédiaire soumis à un régime nival
- Un bassin aval d'influence nivo-pluvial à pluvial

Cette disparité du régime hydrologique des différents cours d'eau du bassin versant est fortement liée au relief qui influence également le volume des précipitations. La pluviométrie est

donc également très disparate sur le territoire et s'échelonne, comme le rappelle le SM3A, entre 800 mm et 2000 mm/an. Toujours d'après le SAGE, l'est du territoire, au relief plus marqué, connait des précipitations supérieures à 1500 mm/an, tandis que l'ouest a des précipitations généralement inférieures à 1200 mm/an. Cette pluviométrie globalement assez importante explique l'important maillage de cours d'eau qui parsèment le bassin versant.

L'Arve et sa vallée sont encaissés (voir Figure 1) et la pente moyenne de son cours est forte. Prenant sa source à 2191 m et en rejoignant le Rhône à 380 m d'altitude, l'Arve a donc une pente de 1,7%[2] et sa capacité à mobiliser les sédiments est d'autant plus forte. Loin d'être anecdotique, cette propension à mobiliser du matériau fait de l'Arve le principal pourvoyeur de sédiments du Rhône (Wildi et al., 2006) sur sa partie amont. En effet, à la confluence entre le fleuve et l'Arve, les débits respectifs sont de 252 m^3/s pour le Rhône et 80 m^3/s pour son affluent, pour autant c'est bien l'Arve qui apporte en ce point l'essentiel des sédiments. Cela s'explique par la proximité du lac Léman qui retient une partie des matériaux charriés par le fleuve qui le traverse.

1.2 Les influences anthropiques sur l'Arve

Comme pour tous les cours d'eau de France métropolitaine, l'homme par ses interactions avec le milieu influence l'état de l'Arve dans de nombreux aspects, qu'ils soient morphologiques, chimiques, biotiques ou hydrologique. L'influence de l'homme sur un cours d'eau donné est d'autant plus marquée que la population résidant dans son bassin versant est importante ou qu'il existe sur le territoire des activités consommatrices d'eau et émettrices de pollutions. Or, par le hasard d'une histoire industrielle et économique singulière et la proximité des frontières avec la Suisse et l'Italie, la pression anthropique sur l'Arve et sa vallée est plus forte que dans des territoires physiquement comparables.

De façon assez évidente, la première contrainte imposée par l'homme au milieu, en particulier à la rivière, est démographique. Selon les chiffres de l'INSEE[3], la population de la vallée dans sa partie française est passée d'un peu plus de 182429 habitants en 1968[4] à 385567 en 2017. En un peu moins de 50 ans sa population a doublé, ce qui est bien au-dessus de la moyenne nationale[5]. Plus encore, avec 193 hab/km² la densité y est même supérieure à la densité

---

[2] A titre de comparaison, d'après le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, pour la partie alpestre du Rhône la « pente moyenne est forte (0,9% ou 9 m/km) ». (http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Le_Rh%C3%B4ne_en_100_questions:_2-01_D%E2%80%99o%C3%B9_vient_l%E2%80%99eau_du_Rh%C3%B4ne_%3F)

[3] https://www.insee.fr/fr/statistiques/3698339.

[4] Recensement précédent immédiatement le début de nos chroniques (1971).

[5] Sur la même période, la métropole est passée d'environ 49 à 64 millions d'habitants (soit une augmentation de 30%).

moyenne en métropole (116 hab/km²) et quatre fois supérieure à celle des Hautes-Pyrénées (51 hab/km² en 2016), territoire que l'on peut estimer physiquement comparable. Cette tendance à l'accroissement de la population, même si elle a légèrement ralenti les 20 dernières années, demeure forte. Ainsi, chaque année, ce sont en moyenne 8600[6] nouveaux habitants qui s'agrègent à la population déjà présente. Cette évolution démographique peut avoir un impact fort sur la ressource en eau qualitativement et quantitativement en l'absence d'infrastructures dédiées ou sous dimensionnées (stations d'épuration).

Parmi les grandes villes occupant le bassin de l'Arve citons Gaillard, Passy, la roche-sur-Foron, Bonneville, Saint-Julien-en-Genevois, Sallanches et Cluses qui comptent toutes plus de 10000 habitants. Quant à Annemasse, commune la plus peuplée, elle compte plus de 35000 habitants, soit plus du double que Cluses qui arrive en deuxième position en terme de population.

Tableau 1 : Évolution de la population de la vallée de l'Arve selon les données INSEE de 1968 à 2016

Années	1968	1975	1982	1990	1999	2006	2011	2016
Habitants	182429	216527	239151	273638	304697	334691	358814	382805
Densité hab/km²	91,4	108,4	119,8	137,0	152,6	167,6	179,7	191,7

La pression anthropique est d'autant plus forte que les activités humaines sont concentrées le long de la rivière comme on peut le voir avec la Figure 3, réalisée à partir des données Corine Land Cover.

[6] Calcul fait entre 1999 et 2016.

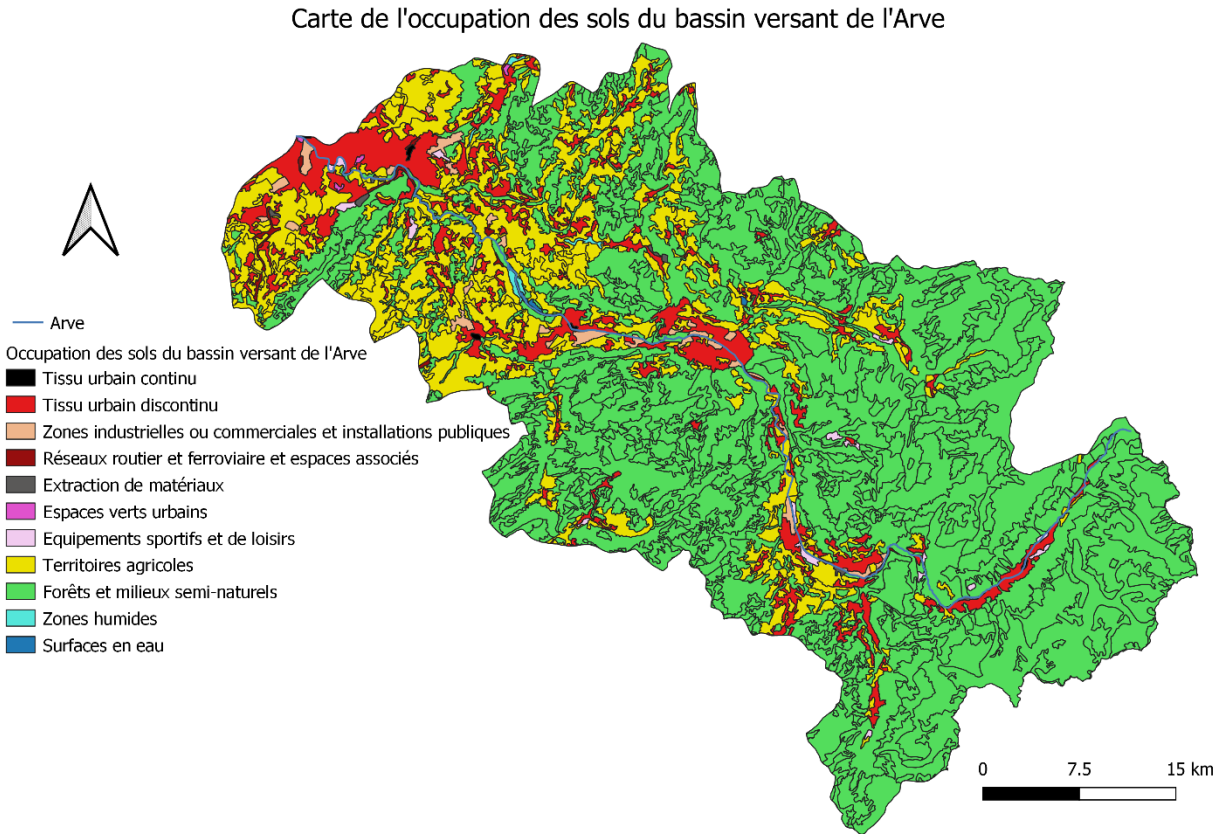


Figure 3 : Carte de l'occupation des sols dans le bassin versant de l'Arve (d'après les données de Corine Land Cover 2012)

En effet, comme on peut le voir avec le Tableau 2 et de façon plus synthétique avec la Figure 4, les surfaces artificialisées représentent plus de 9% de la superficie du bassin, contre 6% à l'échelle de la France métropolitaine (Commissariat général au développement durable, 2015). Elles se trouvent pour l'essentiel le long de l'Arve où les sols artificialisés représentent près de 35% de l'espace à un kilomètre de part et d'autre de l'Arve. Cette hausse de la proportion des sols artificialisés se fait au détriment des espaces boisés[7]. Pour ce qui est des territoires agricoles, la tendance est similaire, mais nettement moins affirmée, leur emprise étant bien plus étendue, en particulier dans l'Arve aval. D'une manière générale, la comparaison entre l'occupation des sols dans l'ensemble du bassin versant de l'Arve ou dans l'immédiate proximité de la rivière (Figure 4) montre que les activités humaines se placent préférentiellement le long de l'Arve, alors que le bassin versant conserve une large part d'espaces naturels (semi-naturels du moins), l'empreinte humaine sur le territoire devient prépondérante dès lors que l'on se situe à proximité de la rivière et en aval du bassin.

[7] Voir également annexe 0

Tableau 2 : Occupation du sol du bassin versant de l'Arve d'après les données Corine Land Cover de 2012

Tissu urbain continu	Tissu urbain discontinu	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	Réseaux routier et ferroviaire	Extraction de matériaux	Espaces verts urbains
0,06%	**8,71%**	**0,92%**	**0,26%**	**0,11%**	**0,05%**
Equipements sportifs et de loisirs	Territoires agricoles	Zones industrielles ou commerciales	Zones humides	Surfaces en eau	
0,38%	**19,83%**	**69,45%**	**0,14%**	**0,09%**	

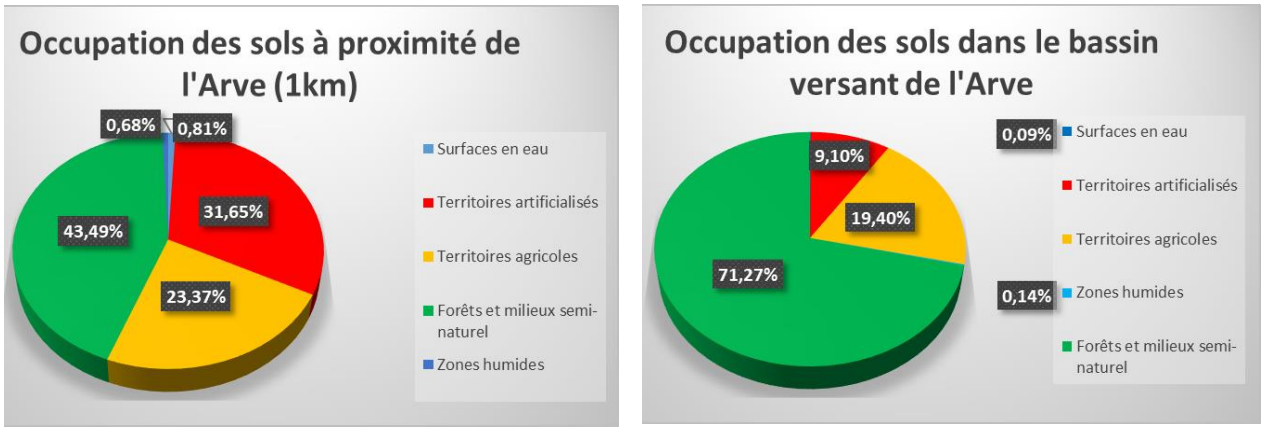


Figure 4 : Occupation des sols sur l'ensemble du bassin versant et à proximité de l'Arve

Quels facteurs peuvent expliquer l'attractivité de ce territoire ? Un premier élément à considérer est son économie. L'industrie y occupe encore une place importante puisqu'elle représente plus du tiers des actifs[8]. L'activité industrielle dans la vallée de l'Arve est ancienne, en particulier en ce qui concerne le décolletage, c'est-à-dire l'usinage de pièces métalliques. Il faut remonter au XVIIIème siècle pour en trouver l'origine. En effet, c'est à cette époque que de nombreux savoyards[9] fabriquent des pièces pour l'horlogerie suisse comme complément de revenus. L'activité a su perdurer et, par la suite, l'industrie a pu trouver localement une main d'œuvre qualifiée et tout un tissu local favorable à l'installation de nouvelles activités. Aujourd'hui encore, le décolletage dans la vallée représente 8000 emplois et 60% du décolletage réalisé en France. Plus largement, ce réseau industriel de haute technicité a permis à la vallée d'être retenue comme pôle de compétitivité autour de l'usinage complexe et de la mécanique de précision. Les

[8] En 2017, la population active représentait 30764 personnes dont 10785 ouvriers.

[9] https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/la-vallee-de-larve-creuset-du-decolletage-ce-fleuron-industriel-encore-meconnu-1010229

impacts industriels sur l'environnement et les milieux aquatiques en particulier peuvent donc avoir une origine ancienne. De plus la vallée est un important lieu de passage et de trafic routier avec le tunnel du Mont-Blanc et le tourisme, comme celui lié aux sports d'hiver, est également très important. Cet afflux saisonnier (plus de 4600000 nuitées pour la communauté de communes du pays du Mont-Blanc en 2019) ("Observatoire touristique," n.d.) pose éventuellement des problèmes dans la gestion de l'accès à la ressource en eau et dans la création d'infrastructures d'assainissement puisqu'il peut nécessiter de surdimensionner les réseaux pour une durée d'utilisation courte.

Enfin, outre l'attrait des paysages montagnards dont « l'authenticité » pourra plaire à une large frange de la population, la proximité de la Suisse offre aux travailleurs transfrontaliers la possibilité de bénéficier des salaires plus importants proposés sur le territoire helvète sans subir les prix plus élevés liés au coût de la vie, en particulier en ce qui concerne le logement.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 L'origine des données

Une première étape de ce travail a été l'acquisition de données de suivi de qualité des eaux. Plusieurs sources sont à disposition mais n'offrent pas toutes le même niveau d'information, que ce soit quantitativement que qualitativement. En effet, certaines chroniques sont très courtes dans le temps et n'apportent des informations que sur quelques points de suivi, alors que d'autres sources donnent accès à des chroniques sur plusieurs décennies avec un suivi de dizaines voire de centaines de molécules et éléments chimiques.

Concernant l'origine de ces données elles sont de 3 ordres principalement :

- Un premier corpus de données est issu de la littérature scientifique et/ou technique, et de documents réglementaires comme le SAGE de l'Arve et le SDAGE Rhône Méditerranée. De recherches bibliographiques initiales, il ressort que l'Arve a été assez peu étudié. L'essentiel des publications concernent les sédiments du barrage de Verbois (Cohén and Briod, 1989). Ce barrage se situe sur le Rhône, quelques kilomètres à l'aval de la confluence Arve-Rhône. L'Arve étant le principal pourvoyeur de sédiments, les études sur les niveaux de pollutions des sédiments du barrage nous donnent des indices sur l'état des matériaux charriés par l'Arve, même s'il est difficile de déduire l'origine géographique précise des éventuelles pollutions. De plus, les paramètres étudiés se limitent le plus souvent à quelques éléments chimiques, en particulier des métaux comme l'argent, le mercure, le nickel, le plomb et le zinc. Enfin, les données issues de la littérature scientifique sont généralement communiquées sous forme de graphiques ce qui en simplifie grandement la lecture mais complexifie, au contraire, leur utilisation. Il existe également une bibliographie scientifique à plus large échelle qui traite de la pollution du Rhône (Cayambo, 2018) ou des grands

fleuves français d'une manière générale (Dendieviel et al., 2020). Évidemment, les données présentées ne sont pas directement utilisables pour l'Arve mais sont utiles comme outils de comparaison et donnent des éléments de temporalité sur la transcription concrète des évolutions réglementaires nationales. Globalement, les données issues de ce corpus seront essentiellement utilisées en complément et pistes de réflexions. Quant aux documents réglementaires, il s'agit le plus souvent de synthèses dont l'objectif assigné est d'être largement diffusées auprès d'un public non initié. Les informations tirées de ces documents permettent donc de fixer un cadre, aider à l'appropriation et à la connaissance du territoire et déterminer les grandes tendances.

- Les données et les publications de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) sont mises à disposition[10]. Les publications portent sur le Rhône et ses principaux affluents, et des éléments de synthèse importants concernant l'Arve sont exposés. Ainsi, on apprend que « l'Arve et la Durance sont les deux affluents les moins contaminés » (OSR, 2018). Concernant les données, une unique station sur l'Arve est utilisée pour leur production. Cette station (Arve_Genève) se situe en Suisse, en partie aval de l'Arve[11], et est gérée par l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), institution publique de la confédération Suisse, même si plusieurs producteurs de données sont associés. Parmi les producteurs de données nous retrouvons évidemment l'OFEV mais également le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) et également l'IRSTEA devenue INRAE. Outre la problématique d'une unique station pour suivre avec précision l'Arve, les données mises à disposition sont retreintes dans le temps et sont limitées en matrices d'études aux matières en suspension (MES). Certaines analyses débutent en 2011 (carbone organique particulaire) mais le plus souvent en 2012 et se terminent en 2014. Les chroniques ne sont donc longues que de 3 ans au maximum. Ces données ne sont pas suffisantes pour faire une étude historique de l'état de l'Arve et de son suivi. Elles peuvent être utilisées en complément du troisième corpus de données.
- Le troisième corpus de données est mis à disposition par le portail Naïades[12] géré par l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Ce portail centralise les données provenant de banques de données de référence comme celles de l'AERM&C ou du SM3A dans le cas de l'Arve (voir liste complète en annexe 19). Le choix des banques référencées se

[10] Les données peuvent être consultées sur le site la page suivante : https://bdoh.irstea.fr/OBSERVATOIRE-DES-SEDIMENTS-DU-RHONE/

[11] Coord. géo. (X) / Coord. géo. (Y) : 943686.32 / 6569365.54

[12] Consultable ici : http://www.naiades.eaufrance.fr/

fait selon des critères de qualité des données comme leur exhaustivité, leur intégrité ou leur contrôle et sur un critère de sécurité des données. L'accès aux données se fait via l'utilisation d'un outil de recherche. Cette recherche peut se faire par territoire administratif, par code hydrographique, par station de mesures ou par cours d'eau. Les trois premières méthodes ne sont pas applicables. En effet, le bassin versant de l'Arve ne correspond à aucun échelon administratif et le département contient d'autres affluents du Rhône et leurs stations de mesures ; la recherche par le code de l'aire hydrographique ne fonctionne pas (les requêtes n'ont jamais permis d'obtenir une liste limitée à l'aire désirée) ; et l'utilisation des codes de stations, les références des stations étant l'objet de notre recherche, n'a pas de sens. C'est donc la recherche par cours d'eau qui a été utilisée et plus précisément par code Sandre afin d'éviter les confusions entre homonymes. En effet, parmi les affluents de l'Arve, plusieurs rivières portent un nom similaire (Foron) ce qui peut entrainer des confusions. La liste des affluents ainsi que leur code Sandre ont été consultés sur le site du Service d'administration national des données et référentiels sur l'eau, ici encore géré par l'OFB. Il ressort de cette recherche que depuis 1971, date de la plus ancienne station de mesure recensée sur le site naïades dans le bassin versant de l'Arve, 188 sites ont été utilisées pour effectuer des mesures, ce qui représente un peu moins de 2800 jours de relevés (Figure 5). De plus, ces mesures peuvent reposer sur plusieurs supports comme l'eau (eau brute ou eau filtrée), les sédiments, les bryophytes et, plus exceptionnellement, les matières en suspensions et les gammares. Ce corpus de données est donc le plus facilement exploitable et également le plus pertinent compte tenu des critères de qualité évoqués plus haut, son importance quantitative et temporelle. C'est donc ce corpus qui sera exploité dans la suite du document et éventuellement complété par un second si besoin.

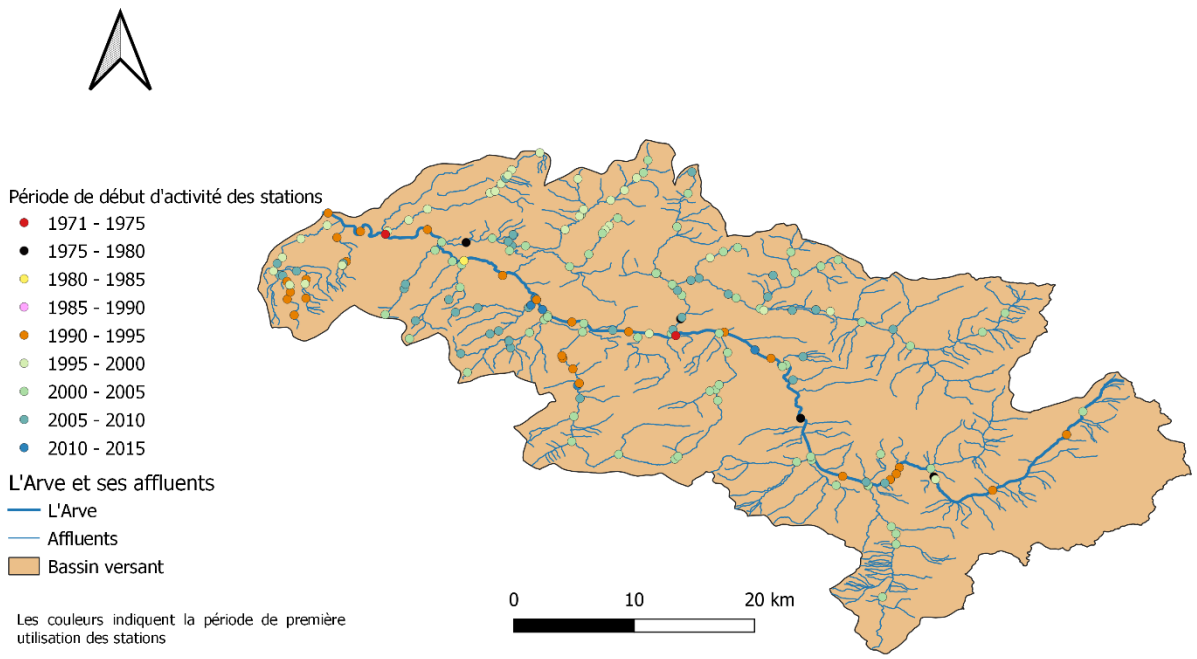


Figure 5 : Carte des 188 stations de mesure de la qualité des eaux utilisées depuis 1971 sur le bassin de l'Arve (données extraites de Naïades)

Enfin, outre les données liées à la qualité de l'eau des trois corpus présentés, des données sur les installations classées, les stations d'épuration, les sites et sols polluées ou les sites industriels sont nécessaires en complément pour proposer des hypothèses quant à l'origine des pollutions, par exemple. Ces données ont été fournies par différents sites institutionnels qui dépendent de l'état français ou plus directement du ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES). Ainsi, les données concernant les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) ou les stations d'épuration proviennent du site data.gouv.fr ; les données sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) proviennent de la base de données BASOL[13], et les données concernant les sites industriels et de services de BASIAS[14]. Ces données étant à l'échelle de la France, un travail de sélection géographique a été opéré avec l'outil QGIS et à partir des limites du bassin versant de l'Arve.

[13] https://basol.developpement-durable.gouv.fr/accueil.php

[14] https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/basias

2.2 Évaluation des tendances temporelles de contamination à l'aide de l'outil Hype

2.2.1 Présentation de Hype

Hype est un outil visant à simplifier l'analyse statistique des séries temporelles de la qualité des eaux souterraines. Il a été développé en 2012/2013 par le BRGM[15]. Cet outil s'appuie sur le langage de programmation R et « permet à la fois de caractériser les séries temporelles d'évolution des contaminants dans les eaux souterraines en calculant les statistiques de base de manière automatique et d'identifier des tendances et des ruptures des séries chronologiques » (Croizet and Lopez, 2015), y compris pour un utilisateur aux compétences en programmation limitées. Néanmoins, un socle minimal de connaissances en informatique est nécessaire pour installer R et utiliser Hype. Pour simplifier, on peut dire que Hype semi-automatise les calculs statistiques, puisque l'utilisateur n'a que deux actions, la création de fichiers selon un certain formalisme et le lancement des différents modules de Hype qu'il souhaite utiliser. Ces modules sont au nombre de six mais seuls quatre ont été utilisés dans le cadre de ce travail :

- lecture.r : permet d'ouvrir le fichier, de préciser le séparateur utilisé pour séparer les colonnes et contrôle la présence des colonnes nécessaires et leur bon intitulé.
- caracterisation.r : permet de faire un certain nombre de calculs statistiques de base sur les données du fichier comme la médiane, les quartiles, la moyenne, l'écart-type ainsi que le résultat du test de Shapiro sur la normalité de la distribution et l'autocorrélation[16].
- tendances_ruptures.r : permet de détecter les tendances et les points de ruptures dans les jeux de données entrés par l'utilisateur d'après un certain nombre de tests statistiques (l'application adapte les tests en fonction de l'état des jeux de données comme le nombre d'analyses, la normalité de la distribution et l'autocorrélation (voir l'annexe 3).
- Mk_saisonnier.r : Ce module permet d'effectuer un test de Mann-Kendall en prenant en compte le caractère saisonnier, « ce test permet d'estimer des tendances de séries cycliques saisonnières ». Il est possible de travailler sur trois périodes différentes : mensuelle, trimestrielle, semestrielle.

---

[15] Il est possible de télécharger Hype à l'adresse suivante : https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/formulaire-telechargement-logiciel-hype

[16] Le test d'autocorrélation permet de mettre en évidence que les résultats sont influencés par les précédents.

Sur les quatre modules présentés, deux ont été plus particulièrement utiles, celui de lecture et celui de tendances. Bien que développé pour étudier les eaux souterraines, il est possible d'utiliser Hype pour d'autres support de pollution des eaux. L'INRAE a en effet étudié cette possibilité pour les sédiments et les matières en suspension (Yari et al., 2019). Il ressort de cette étude que l'utilisation de Hype est pertinente si toutefois un certain nombre de précautions sont prises dans l'étude des données, comme un nombre minimal de données (≥10) ou la suppression des valeurs aberrantes. Cependant, même si ce nombre a été privilégié la quantité de données à disposition ne nous a pas permis de le respecter systématiquement. Ce point sera développé plus loin.

2.2.2 Les étapes

Nous décrivons succinctement l'utilisation de l'outil Hype, pour plus de détails voir (Croizet and Lopez, 2015). Comme évoqué plus haut l'utilisation de Hype est assez simple, elle consiste dans une première étape à l'enregistrement des différents modules et fichiers du package de Hype dans un répertoire laissé à la discrétion de l'utilisateur, puis à la création d'un fichier .txt selon un formalisme prédéfini. En particulier, on retrouvera six colonnes qui permettent l'identification du site de prélèvement, de préciser les dates de prélèvement, d'identifier le ou les paramètres étudiés, de donner le résultat et de le qualifier (par exemple si la valeur est au-dessus ou en-dessous du seuil de quantification) et, enfin, de préciser l'unité des mesures.

L'utilisateur doit ensuite lancer l'application R. Il est possible d'utiliser RStudio comme environnement de travail pour faciliter l'utilisation de R. Ensuite, l'utilisateur contrôle la présence de certaines « librairies »[17] (à télécharger si besoin), puis indique à R le répertoire dans lequel se trouvent les modules à utiliser (pour ce faire, on utilise la fonction setwd(« »)). Ces préalables réalisés, il reste à lancer les différents modules de Hype[18] en commençant par le module lecture.r qui permet de récupérer le fichier de données au bon format que l'on aura préalablement créé. Les autres modules peuvent être utilisés indépendamment les uns des autres.

2.2.3 Les tests statistiques réalisés par Hype

Le module tendances_ruptures.r applique de nombreux tests statistiques dont certains sont également utilisés par le module caractérisation.r. Cette partie vise à présenter de façon concise les principaux tests effectués et leurs règles. Le lecteur peut consulter le détail des formules dans le manuel d'utilisation de Hype produit par le BRGM (Croizet et Lopez 2015).

---

[17] Kendall, plotrix et chron.

[18] On utilise la fonction source : source(« nom du fichier »).

Le test statistique de normalité est celui de Shapiro-Wilk pour lequel le H0 (hypothèse nulle) est que les résultats sont normalement distribués. Ce test n'est effectué que pour les fichiers comportant plus de 3 résultats, ce qui est en deçà de la limite de 10 résultats que nous avons retenue pour notre étude. Puis, à chaque rang (prélèvement dans l'ordre chronologique) un test d'autocorrélation est effectué. On considère que l'autocorrélation à un rang donné est significative si ce résultat est supérieur à une valeur limite calculée (qui dépend d'un seuil de significativité défini à 0,95 par les créateurs de Hype).

Le test de Mann-Kendall permet de définir les tendances et ne s'applique qu'aux jeux de données contenant au moins 10 valeurs. Le H0 est l'absence de tendance. Si la P-value est inférieure à 0,05, le module calcule alors une pente, la pente dite de Sen. Dans le cas où la chronique comporterait plus de 40 données, un deuxième test de tendance est effectué, le test de Mann-Kendall modifié. Ce test tient alors compte des résultats, pour chaque rang, du test d'autocorrélation. Si la P-value est inférieure à 0,05 alors le module calcule la pente de Sen comme dans le cas précédent.

Dernier test de tendances, la régression linéaire n'est calculée que pour les chroniques ayant plus de cinq éléments. L'hypothèse H0 est que les données ne sont pas linéairement dépendantes du temps.

Deux tests de ruptures sont réalisés par le module, le test de Pettitt dans le cas de chroniques de plus de cinq éléments et si la distribution est non normale (avec H0 = absence de rupture), et le test de Buishand, quand on dispose de dix valeurs ou plus et que la distribution est normale et pour lequel H0 est l'absence de rupture. Le test d'inversion de tendance est celui de changement de pente de Darken. Si une date est identifiée le module calcule les pentes avant et après cette rupture.

2.2.4 La correction des données

Pour que nos raisonnements et nos hypothèses aient du sens, une première étape consiste à s'assurer que les données sont de qualité. Ne pouvant obtenir d'informations sur la collecte des échantillons et les méthodes d'analyses, nous avons été obligé de faire confiance aux différents opérateurs et au site Naïades qui a déjà opéré, normalement, un certain nombre de contrôles de qualité. Pour autant il est important d'appliquer des contrôles supplémentaires permettant de relever les données en limite de quantification et de détecter les valeurs aberrantes. L'INRAE propose ainsi de réaliser un test de Grubbs (Yari, Dabrin, et Coquery 2019) pour éliminer les valeurs aberrantes.

Nous avons effectué ce test de Grubbs sur les données Naïades des stations de l'Arve étudiées dans ce travail. Le test de Grubbs a été appliqué uniquement lorsque les données avaient une distribution normale. Pour effectuer ce test, une adaptation d'un module Hype a été faite afin de bénéficier de certaines opérations (test de shapiro-Wilk) opérées par le module caracterisation.r. Au final, l'essentiel du code a été repris avec quelques modifications telles que les fichiers de

sorties, l'automatisation de certaines demandes comme le format du fichier ou le lancement automatique du module de lecture. Outre les modifications de l'existant le codage a nécessité l'ajout de boucles pour le test de Grubbs, de messages pour l'utilisateur ainsi que des librairies complémentaires nécessaires[19] et d'une colonne position pour la suppression des lignes détectées comme aberrantes.

Ci-après le code de la boucle de test de Grubbs imbriquée dans le test de Shapiro-Wilk du module Hype de caractérisation modifié :

```
if (pval_shapi[i]>=0.05|is.na(pval_shapi[i])) {
while(grubbs.test(donnees2[,1],type=10)$p.value<0.05){x = which.max(donnees2[,1])
donnees2[which.max(donnees2[,1]),1] <- NA
vect_supp <- donnees2[is.na(donnees2[,1]),2]
vecteur_fin <- c(vecteur_fin,vect_supp)
}
```

Quant aux limites du module, on peut en relever deux principales :

- la nécessité d'avoir des données avec une distribution normale
- des erreurs sur certains jeux de données (environ 2/10).

Alors que la première est inhérente à l'utilisation de ce test, la seconde est plus vraisemblablement liée à une erreur de codage. Devant l'impossibilité de corriger ce problème, il a été finalement décidé pour les fichiers problématiques, de conserver les données originales, sans correction statistique. Notons également que lorsque l'on supprime une partie des données des fichiers problématiques il n'y a plus d'erreur. Tardivement et après réflexion, il se pourrait que l'erreur provienne du choix du module Hype source (module caracterisation.r) qui connait également des dysfonctionnements avec certains fichiers au contraire du module sur les tendances.

2.2.5 Les limites de Hype

L'idée de ce paragraphe n'est pas de décourager le lecteur d'utiliser Hype, qui s'est montré performant et simple à utiliser, mais de mettre en évidence les quelques limites et problèmes qu'un utilisateur peut rencontrer afin que les nouveaux utilisateurs en tiennent compte.

[19] Les librairies « dplyr », « outliers » ainsi que « Kendall » et « plotrix » (également utilisées dans les modules Hype).

Le premier problème, évoqué plus haut, est le dysfonctionnement occasionnel du module de caractérisation avec certains jeux de données. Ce problème est compensé en partie par le module de tendances qui reprend une partie des calculs de ce module.

Autre limite, l'application pour un jeu de données ne calcule qu'un unique point de rupture. Ceci permet d'identifier les grandes modifications mais pas nécessairement les ruptures plus discrètes, non visibles à l'œil. Par exemple, si l'on considère que les ruptures sont liées à des changements de pratiques, il n'est pas certain qu'un changement technique qui interviendrait quelques mois/années après un autre changement majeur soit visible du fait que les niveaux de concentrations ont déjà largement diminué.

Une remarque identique peut être faite sur le point d'inversion de tendance.

Au final, Hype est un outil très puissant qui simplifie grandement le travail d'un utilisateur qui aurait de nombreuses données à traiter malgré les quelques limites évoquées. En effet, l'étude des données demeure une étape essentielle d'un travail de recherche et Hype offre une approche plus objective que la simple observation visuelle car reposant sur des outils statistiques.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Évolution du réseau de surveillance des pollutions aquatiques dans le bassin versant de l'Arve

3.1.1 Évolution du suivi dans le temps

Comme le montre la Figure 5, le réseau de suivi est disparate dans l'espace avec une plus forte concentration dans la moitié aval, sur l'Arve et sur quelques autres rivières comme l'Aire. Quant à l'évolution au cours du temps de ce réseau, il croît logiquement. Visuellement on peut distinguer trois grandes périodes :

- 1971 – 1990 : peu de stations testées chaque année (≤ 6)
- 1991 – 2005 : timide montée en puissance (moyenne inférieure à 14)
- 2006 – 2019 : Densification du réseau, qui semble se stabiliser autour de 15 à 18 stations à partir de 2013

On remarque que la hausse des années 90 semble répondre à la loi sur l'eau de 1992 et que les quelques années exceptionnelles, en particulier entre 2002 et 2008, suivies d'une dernière phase plus modérée mais qui conserve une moyenne élevé (20,45 entre 2009 et 2019) semblent répondre à la mise en place de la DCE en 2000. Nous ne pouvons pas conclure définitivement sur cette question, du fait du manque d'éléments, mais ces différentes hausses quantitatives sont probablement liées, au moins en partie, à l'évolution du contexte réglementaire.

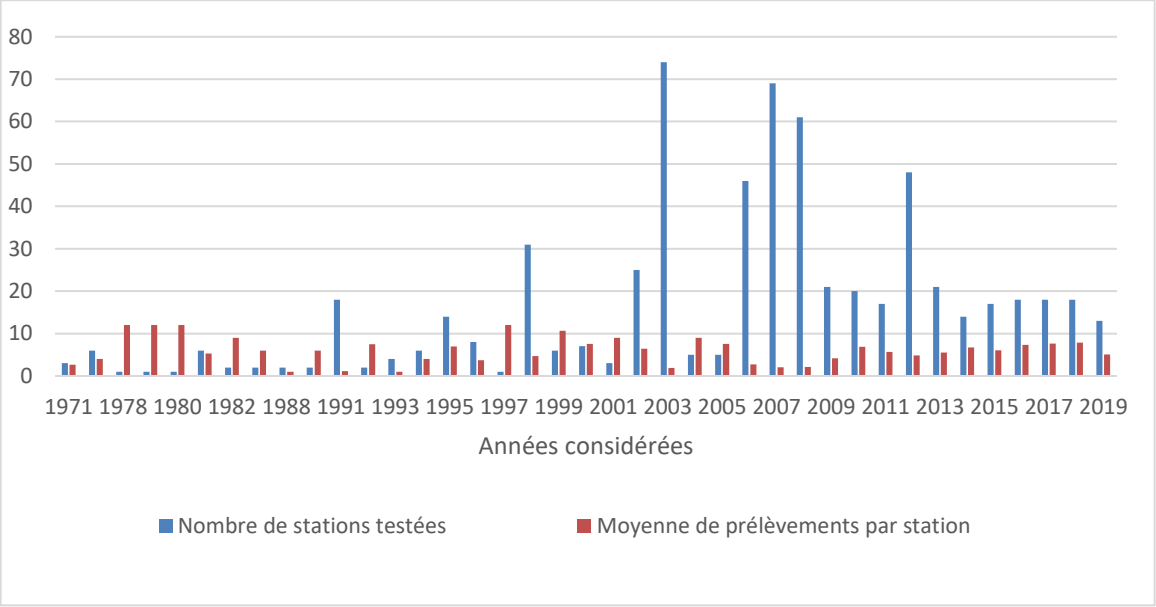


Figure 6 : Nombre de stations contrôlées chaque année et nombre moyen de prélèvement par stations contrôlées une année donnée

Peut-on avoir un même raisonnement sur les aspects qualitatifs ? Le nombre moyen de prélèvements par station et par an n'augmente pas et l'apparente diminution est plus due au faible nombre de stations testées (une seule certaines années qui donne une moyenne très importante) qu'à un suivi moins régulier (voir en annexe 7).

Le nombre de paramètres suivis peut également nous renseigner sur la qualité de la surveillance de l'Arve et de son bassin versant ainsi que son évolution dans le temps. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 7, le nombre de paramètre, très faible jusqu'à la fin des années 90, connaît une brusque accélération en 1998. Depuis, le nombre de paramètres continue d'augmenter régulièrement et parfois même de façon importante pour dépasser les 1000 (1128 paramètres suivis en février 2018 à la station de Arthaz Pont-Notre-Dame). L'accroissement important du nombre de nouveaux paramètres en 1998 et 1999 est lié à la mise en place du suivi sédimentaire qui n'était pas utilisé auparavant. Il convient de s'interroger sur la mise en place d'une surveillance des sédiments en 1998. Pourquoi à ce moment ? S'agit-il d'une réponse à la fiche du SEQ-Eau (1999) sachant que les agences de l'eau ont été associées directement à l'élaboration de cette dernière. Quant aux paramètres apparus après l'an 2000, il est probable qu'ils soient la conséquence d'une modification du marché de prestation, soit par des ajouts au marché existant soit par le changement de prestataire. S'agit-il alors de répondre à une demande de la maîtrise d'ouvrage ou est-ce une proposition du prestataire ou simplement le résultat d'une analyse multirésidus (pour les substances d'une même famille) qui permettrait de suivre plus de paramètres qu'initialement demandés. Sur ce point, nous n'avons pas pu obtenir d'information dans les fichiers Naïades pour la période qui nous intéresse et l'agence de l'eau n'a pas pu nous répondre car sollicitée trop tardivement. Dans tous les cas, comme pour le nombre de stations, visuellement cela semble lié au corpus législatif et réglementaire qui grossit rapidement au début du XXIème siècle, combiné à l'amélioration et à la baisse des coûts des techniques analytiques.

Citons par exemple les différentes versions de la DCE (2000, 2008, 2013) ou la liste des substances prioritaires de 2001, les circulaires au niveau national (2005, 2006, 2007) et les arrêtés d'évaluation de l'état des eaux (2010, 2018). Ainsi, 18 substances de la liste de 2001 sur les 43 commencent à être suivies entre 2000 et 2005 (voir liste en annexe 11 et 14) en particulier des HAP, des pesticides, des esters et des hydrocarbures.

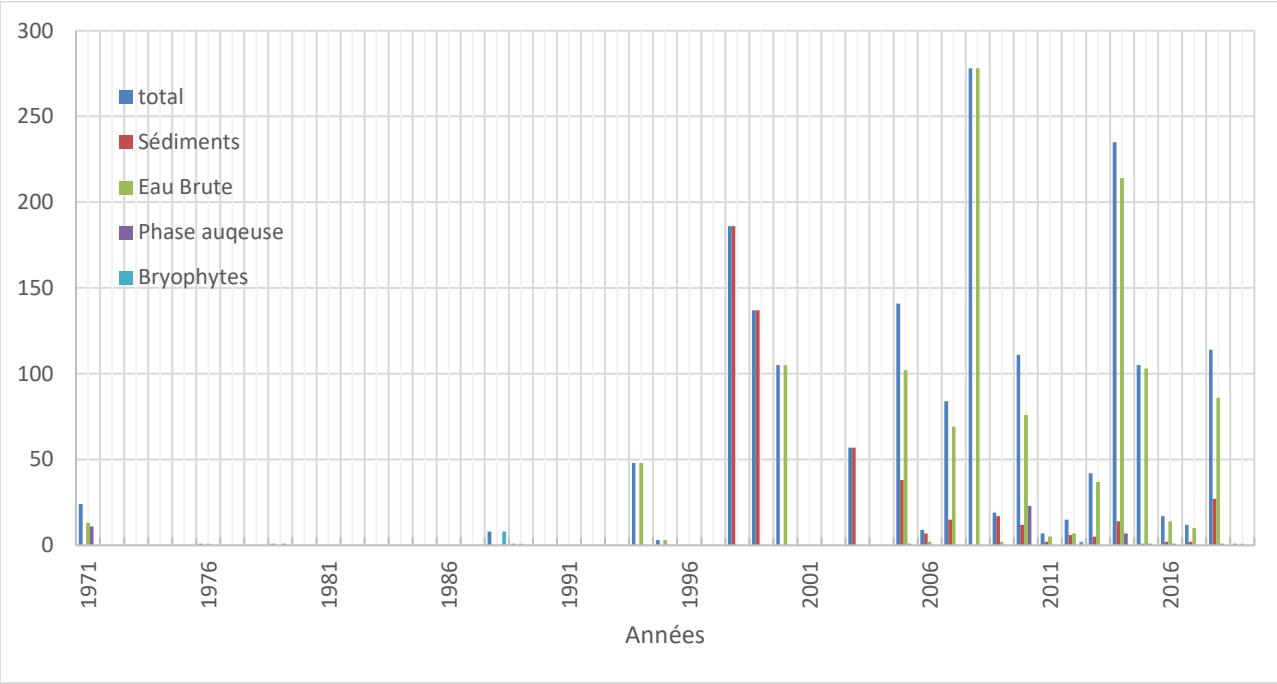


Figure 7 : Nombre de nouveaux paramètres suivis par support et par année de 1971 à 2018, sur le bassin de l'Arve

Sans les différentes pièces des marchés publics liant laboratoires d'analyses et maîtrises d'ouvrage ou les comptes rendus des comités de pilotage de ces marchés, il nous est impossible d'être affirmatifs. Malgré tout, il semble que cette inflation du nombre de substances mesurées est liée au contexte réglementaire, c'est du moins ce que laisse supposer l'analyse quantitative réalisée ci-dessus. L'amélioration qualitative et quantitative du suivi paraît bien être la conséquence de l'évolution réglementaire et de l'amélioration des techniques analytiques (qui sont sans doute une conséquence indirecte de l'évolution du contexte réglementaire).

L'évolution du suivi par les différents acteurs semble également corroborer ce lien entre réglementation et suivi de l'Arve, en particulier en ce qui concerne le suivi opéré par l'agence de l'eau. En effet, sur la Figure 8 on observe que l'AERM&C suivait peu le bassin versant de l'Arve avant l'an 2000 et que son suivi s'est nettement intensifié dès 2001.

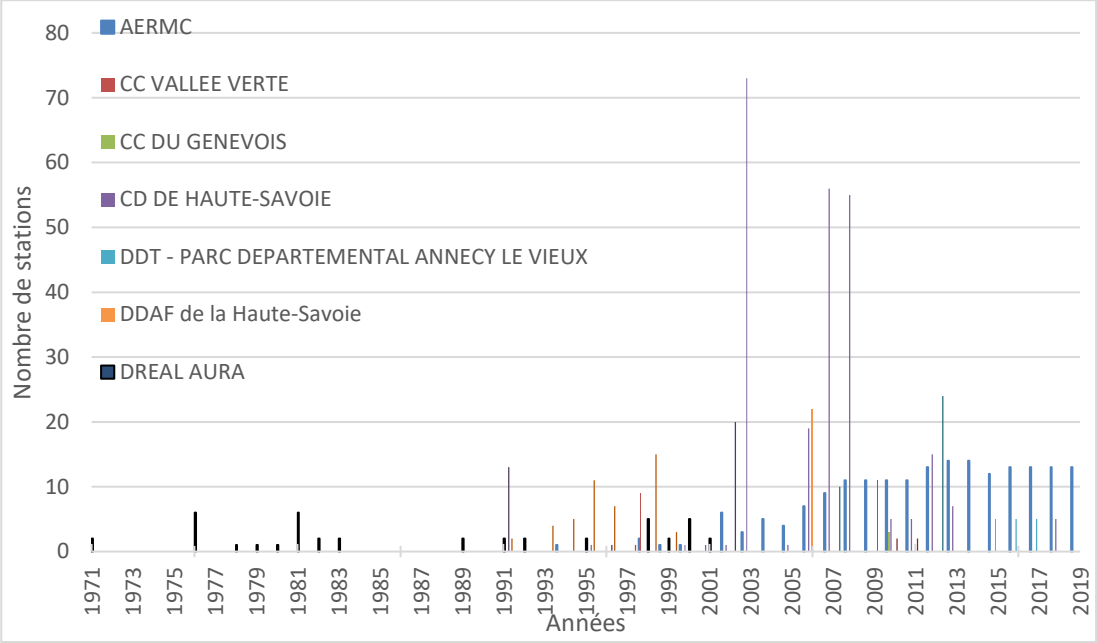


Figure 8 : Nombre de stations suivies par années pour les différents producteurs de données du bassin versant de l'Arve

3.1.2 Un réseau disparate : un bassin versant inégalement suivi géographiquement et quantitativement

Comme on peut le voir sur la Figure 5, les 188 stations de prélèvements sont assez inégalement réparties sur le bassin versant de l'Arve et ne concernent que 58 rivières sur les 313 (l'Arve et ses 312 affluents) qui le composent. En particulier, le réseau est moins dense à l'amont de l'Arve. Beaucoup des affluents amonts n'ont pas de données dans le fichier Naïades. Cette situation est encore plus manifeste lorsque l'on s'intéresse aux 13 principales stations, c'est-à-dire les seules stations à avoir 60 ou plus de jours de prélèvements.

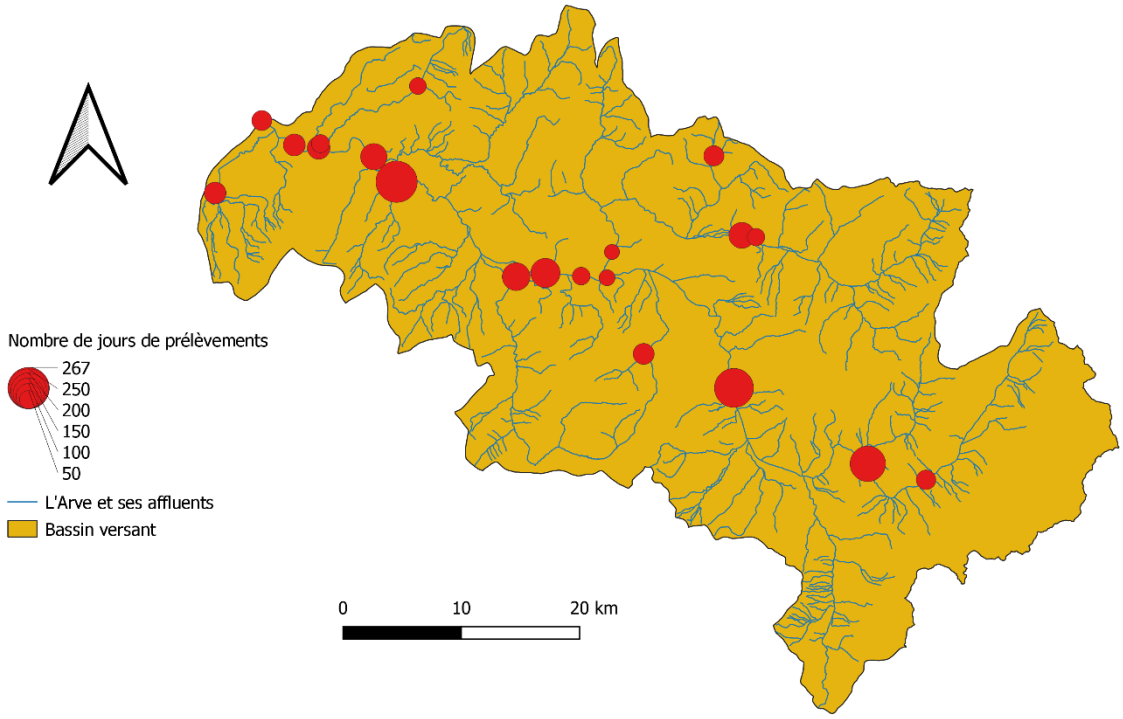


Figure 9 : Carte des principales stations de suivi de la qualité de l'eau dans le bassin versant de l'Arve (13 stations avec > 60 prélèvements sur la période 1971-2019, dont 7 stations sur l'Arve, et une sur l'Aire, le Borne, le Foron, le Grand Foron, le Giffre et la Menoge)

On remarque que c'est essentiellement l'Arve qui est surveillé et que les stations sont plus nombreuses sur sa moitié avale. Quant aux affluents, seuls six ont des stations pérennes largement suivies (l'Aire, le Borne, le Foron, le Grand Foron, le Giffre et la Menoge). Pour autant la question de savoir quelles rivières sont les plus suivies se pose, si l'on considère que la longueur du cours d'eau crée un biais. En effet, il est attendu qu'un cours d'eau de 100 kms ait plus de stations qu'un cours d'eau de 10 kms. Le seul critère du nombre de stations n'est donc pas pertinent ni même celui du nombre de jours de prélèvements qui est conditionné par le précédent, d'autant que certaines stations ne sont testées qu'une seule fois ce qui peut contribuer à biaiser la vision du suivi d'un cours d'eau. Une approche possible est de calculer une densité linéaire des jours de prélèvements (c'est-à-dire diviser le nombre total de jours de prélèvement par la longueur du cours d'eau). On peut également coupler cet indicateur au nombre d'années de suivi moyen des stations sur un cours d'eau, ou au nombre de jours moyen de suivi du cours d'eau surveillé. Enfin, un dernier indicateur pourrait être le nombre de jours cumulés de prélèvements sur le nombre total d'années et la longueur du cours d'eau.

Ainsi, d'après ces indicateurs synthétisés dans le Tableau 3, le Borne, le Foron du reposoir, le Foron (V0130500) ou le Giffre, l'Aire et la Menoge sont les affluents de l'Arve (de plus de 10 km de long) ayant bénéficié du « meilleur » suivi de la qualité de leurs eaux. Pour l'Aire, même si le suivi est important, on peut s'étonner qu'il ne soit pas sorti dans le duo des cours d'eau au meilleur suivi. En effet, c'est cette rivière qui possède la densité linéaire la plus importante en stations (0,58 stations/km contre 0,25 pour l'Arve). Cela s'explique par la faible pérennité (en moyenne) de ses stations, alors même qu'une des stations les plus importantes du bassin versant est localisée sur l'Aire. En fait, comme déjà évoqué, beaucoup de stations du corpus de données n'ont été utilisées que quelques fois.

Malheureusement, même s'il existe un champ précisant le type de stations (RCS, RCO, réseau complémentaire ou réseau national) il n'est que très imparfaitement renseigné[20] et ne peut donc pas nous renseigner sur les raisons d'un changement de site. Quelques hypothèses cependant peuvent expliquer la variabilité de la pérennité des stations. D'abord, on peut rejeter l'idée que l'abandon d'un site soit lié à une baisse de moyens, l'augmentation dans le temps du nombre de stations semble la réfuter à moins qu'une évolution dans l'origine des financements change les priorités. Quatre autres hypothèses paraissent plus vraisemblables :

- un suivi ponctuel, lié à un rejet accidentel, à un événement exceptionnel qui fait craindre un évènement de pollution ou simplement un besoin particulier du commanditaire ;
- un station habituelle rendue inaccessible du fait de travaux, d'une crue ou toute autre situation empêchant l'accès au site ;
- une moindre pollution rende la station moins prioritaire ;
- le remplacement d'une station par une autre, pour des raisons organisationnelles (mieux situé, plus simple d'accès) ou technique comme l'implantation d'un nouveau site industriel ou d'une source de rejets que l'on souhaite évaluer.

Ainsi, pour chaque station n'ayant pas perduré il est probable qu'une de ces hypothèses s'applique. Pouvoir passer de l'hypothèse au fait nécessite d'avoir accès aux archives recensant les rejets accidentels ou les comptes rendus des agents de terrain s'ils existent ; une autre possibilité serait de questionner les collectivités et services en charge de l'assainissement pour savoir s'ils ont gardé des traces d'évènements de pollution. La consultation d'archives locales avait été envisagée dans le cadre du stage mais les contraintes liées à la pandémie n'ont pas permis de les réaliser dans un délai acceptable. Enfin, l'enquête auprès des collectivités a été envisagée trop tardivement pour permettre l'intégration des éventuelles données ainsi recueillies sans pénaliser le reste du travail d'étude et de rédaction. Malgré tout, même si cela ne permet

[20] Par exemple, pour le Giffre, ce champ est renseigné 8176 fois pour 34706 lignes (1/4) tandis que pour l'Arve il est renseigné 50865 pour 272796 lignes (1/5).

pas de conclure, notons que les stations suivies par l'AERM&C le sont en moyenne pendant 9 ans, 4,8 ans pour la DREAL (ou du moins les services qui l'ont précédée), 3 ans pour la DDT et moins de 2 ans pour les autres entités. Il semble donc bien que la pérennité des stations soit liée aux besoins du commanditaire du suivi même si on ne peut pas exclure les autres hypothèses.

La nature du commanditaire des mesures n'impacte pas que la pérennité des stations, elle est également liée avec leur répartition et les supports d'études. En effet, l'essentiel des stations de l'AERM&C se situent sur l'Arve et le Giffre (14 sur 21) quand le conseil départemental a des stations sur l'essentiel des cours d'eau suivis. Le SM3A, quant à lui, suit presque exclusivement l'Arve. Pour ce qui est des supports de suivi, l'AERM&C suit le tiers des stations bryophytes, la moitié des stations sédiments et est la seule à avoir mis en place un suivi des gammares et des MES.

Au final, on a donc un réseau qui a crû dans le temps sous l'impulsion de la réglementation mais qui reste très inégal qualitativement et quantitativement dans l'espace du bassin versant avec certains cours d'eau mieux contrôlés que d'autres.

Cette différence dans le suivi se manifeste également dans les supports étudiés (eau brute, eau filtrée, …) dont la répartition est loin d'être homogène sur le territoire et qui dépend largement des producteurs de données.

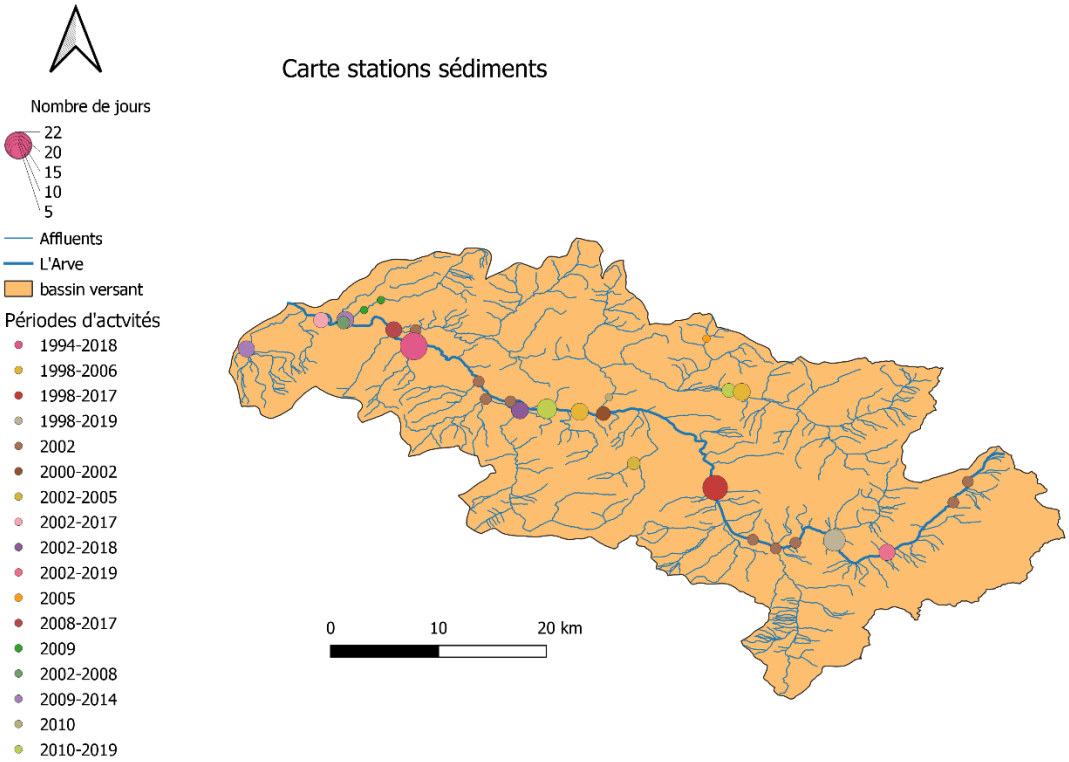
Tableau 3 : Qualité du suivi de la qualité de l'eau des cours d'eau du bassin versant de l'Arve de plus de 10kms de long (indicateurs calculés à partir du nombre de stations et de jours/années de prélèvement et de la longueur des cours d'eau) depuis 1971

*	Arve	Foron V0240500	Foron V0220580	Foron V0210500	La Menoge	Le Giffre
Longueur en km	108,00	22,00	12,00	12,00	30,00	47,00
Nbre jours/longueur	**11,69**	5,64	0,58	3,08	**5,97**	**5,62**
années/nombre stations	**6,48**	**6,50**	3,50	3,20	3,23	**4,13**
nombre de jours/années d'activité	**7,21**	3,18	1,00	2,31	**4,26**	**4,26**
Nbre de jours/(nbre années*longueur)	0,07	0,14	0,08	**0,19**	0,14	0,09
	Le Viaison	La Sallanches	L'Aire	Le Bon Nant	Le Sion	Le Risse
Longueur en km	11,00	10,00	19,00	23,00	10,00	18,00
Nbre jours/longueur	0,55	1,80	**7,68**	1,39	1,20	1,61
années/nombre stations	1,50	**4,00**	2,64	2,50	1,00	3,00
nombre de jours/années d'activité	1,00	2,25	**5,03**	3,20	2,40	1,93
Nbre de jours/(nbre années*longueur)	0,09	**0,23**	**0,26**	0,14	0,24	0,11
	le Borne	Le Foron du reposoir	Le Foron V0130500	Le Foron V0230600		Moyenne
Longueur en km	34,00	14,00	13,00	19,00		
Nbre jours/longueur	**5,03**	**6,29**	**5,46**	0,89		4,03
années/nombre stations	**4,50**	**4,80**	**4,25**	1,83		3,57
nombre de jours/années d'activité	**4,75**	**3,67**	**4,18**	1,55		3,26
Nbre de jours/(nbre années*longueur)	0,14	**0,26**	**0,32**	0,08		0,16

*En gras sont indiquées les valeurs supérieures à la moyenne

3.1.3 L'état des cours d'eau : suivi de l'eau et autres supports

Le suivi de l'état des rivières du bassin versant de l'Arve n'est pas limité au simple suivi physico-chimique des eaux. Un certain nombre d'autres supports sont contrôlés, outre l'eau sous sa forme d'eau brute ou en phase aqueuse (filtrée). Les quatre supports qui peuvent être retrouvés dans le corpus étudié sont les sédiments, les bryophytes, les matières en suspension (MES) et les gammares (des crustacés). Avec les sédiments et les bryophytes on voit, dans les cartes de la Figure 10, qu'une nouvelle fois l'Arve est privilégié et que le Giffre est également bien suivi ainsi que le Foron (V0130500) à la frontière franco-suisse, le Borne ou l'Aire dans une moindre mesure. Cela confirme nos résultats du Tableau 3 dans lequel ces rivières ressortaient plus particulièrement.



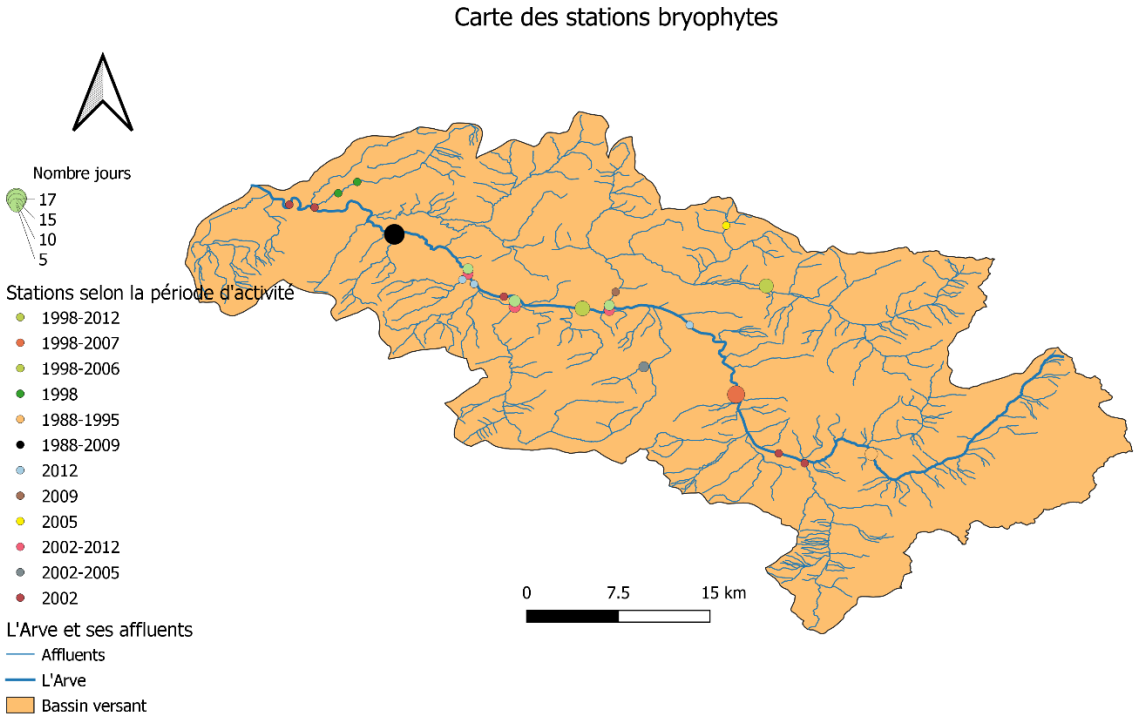


Figure 10 : Cartes des stations de prélèvements des sédiments et des bryophytes et indicateur sur le nombre de prélèvements

Outre le nombre finalement restreint de stations concernées par les mesures sédimentaires ou le prélèvement de bryophytes (nombre encore plus réduit pour les gammares et les MES) d'autres éléments distinguent ces supports du suivi chimique de l'eau, comme l'ancienneté des mesures et leur fréquence. Alors que l'eau est suivie 10 à 12 fois par an pour certaines stations, les mesures sur sédiments ou bryophytes ne sont réalisées en général qu'une seule fois et plus exceptionnellement deux fois par an. Quant au début du suivi, il s'est opéré en 1988 pour les bryophytes et en 1998 pour les sédiments contre 1971 pour l'eau.

De plus, que ce soit pour les données concernant le support eau ou les sédiments, il s'est posé le problème des limites de quantification (LQ). Pour beaucoup de paramètres, la lecture des évolutions temporelles ou de la distribution spatiale est complexifiée par l'évolution pas toujours compréhensible de ces LQ. Alors qu'on pourrait penser que l'amélioration technique permettrait d'abaisser ces LQ au cours du temps on observe que certaines LQ remontent. Cette évolution pourrait être liée à une modification du marché voire au remplacement du prestataire, ou plus simplement qu'une contrainte particulière ait obligé le laboratoire d'analyse à utiliser un appareillage moins précis. Cela est malheureusement invérifiable en l'absence d'informations sur les marchés de prestations et de comptes rendus des différentes opérations (archives non conservées à l'AERM&C au-delà de 5 ans).

Enfin, une dernière problématique, la modification du support d'étude entre eau brute et eau filtrée pour certains paramètres, en particulier les métaux. Si l'on prend le cas de la station de

Pont Notre Dame à Arthaz, c'est le cas de l'arsenic qui est suivi dans l'eau brute jusqu'en 2009 puis sur eau filtrée. Tout ceci contribue à complexifier l'analyse des données pour avoir une vision claire de l'évolution des concentrations dans le temps.

Au final, le fait que les autres supports que l'eau concernent principalement l'Arve et le Giffre, mais aussi le Foron, l'Aire et le Borne, témoigne d'un intérêt plus grand des différentes maitrises d'ouvrage en charge du suivi de la qualité des eaux pour ces rivières.

3.1.4 Analyse de la pression anthropique du bassin versant de l'Arve

Comme dit plus haut (chapitre 0), la vallée de l'Arve offre une certaine hétérogénéité physique et d'occupation des sols. Corollaire de ceci, les impacts liés aux activités humaines ne se répartissent pas de façon homogène sur l'ensemble du territoire, la pression anthropique diffère donc dans l'espace (en particulier en ce qui concerne l'émission des PCB, HAP et des ETM) et se pose alors la question : Comment déterminer les espace soumis à des impacts forts et donc susceptibles d'accueillir des stations de suivi de la qualité de l'eau ?

Nous proposons de retenir plusieurs paramètres qui permettent de localiser les sources de pressions polluantes hors pressions liées aux usages agricoles. Quatre paramètres à l'échelle communale ont été retenus pour leur pertinence et la facilité d'acquisition des données : la densité[21] de population, la densité de sites BASOL, la densité de sites BASIAS et la densité des ICPE en activité. Pour éviter qu'un même site ne soit pris en compte deux fois, ce qui risquerait d'exagérer la sensibilité à la pollution de certaines zones par rapport aux autres, les sites BASIAS ne prennent pas en compte les ICPE en activité.

Pour chaque paramètre une note allant de 0 à 4 a été attribuée à chaque commune du territoire. L'attribution des notes s'est faite selon les quartiles pour les notes de 0 à 2 et selon une valeur intermédiaire entre le dernier quartile et le maximum relevé afin de ne pas trop lisser le poids de territoires aux densités très éloignées. Ainsi, les valeurs inférieures au 1er quartile ont une note de 0 et ainsi de suite.

Tableau 4 : Répartition des notes selon les "densités" calculées pour chaque commune du bassin de l'Arve à partir des données de population, nombre d'ICPE, site BASOL, site BASIAS.

	1er quartile	2e quartile	3e quartile	Valeur intermédiaire	Maximum relevé
Densité population	] 0 ; **64,3**]	] 64,3 ; **137**]	] 137 ; **276**]	] 276 ; **1000**]	] 1000 ; **7185**]
Densité ICPE	] 0 ; **0,08**]	] 0,08 ; **0,17**]	] 0,17 ; **0,39**]	] 0,39 ; **0,8**]	] 0,8 ; **1,48**]

[21] La donnée sur la densité est ici calculée à partir du nombre habitants/sites BASOL/sites BASIAS/sites ICPE sur la superficie des communes à l'intérieur du bassin versant. Cette superficie est obtenue grâce à des modules de QGIS.

Densité BASOL	] 0 ; **0,06**]	] 0,06 ; **0,10**]	] 0,10 ; **0,26**]	] 0,26 ; **0,5**]	] 0,5 ; **1,01**]
Densité BASIAS	] 0 ; **0,25**]	] 0,25 ; **0,68**]	] 0,68 ; **1,49**]	] 1,49 ; **10**]	] 10 ; **41,85**]
Note	0	1	2	3	4

La somme des quatre notes permet d'obtenir une note sur 16 pour chaque commune. Une note de 0 correspond à une commune peu exposée et une note de 16 à un territoire très exposé. La Figure 11 permet de visualiser le résultat de cette classification, pour la partie française du bassin versant. On remarque que les territoires subissant a priori les plus fortes pressions sont traversés par l'Arve ou en sont très proches, à l'exception de la rivière Aire au sud-ouest du bassin où la pression anthropique est également très marquée. En revanche, l'amont du bassin versant semble moins exposé.

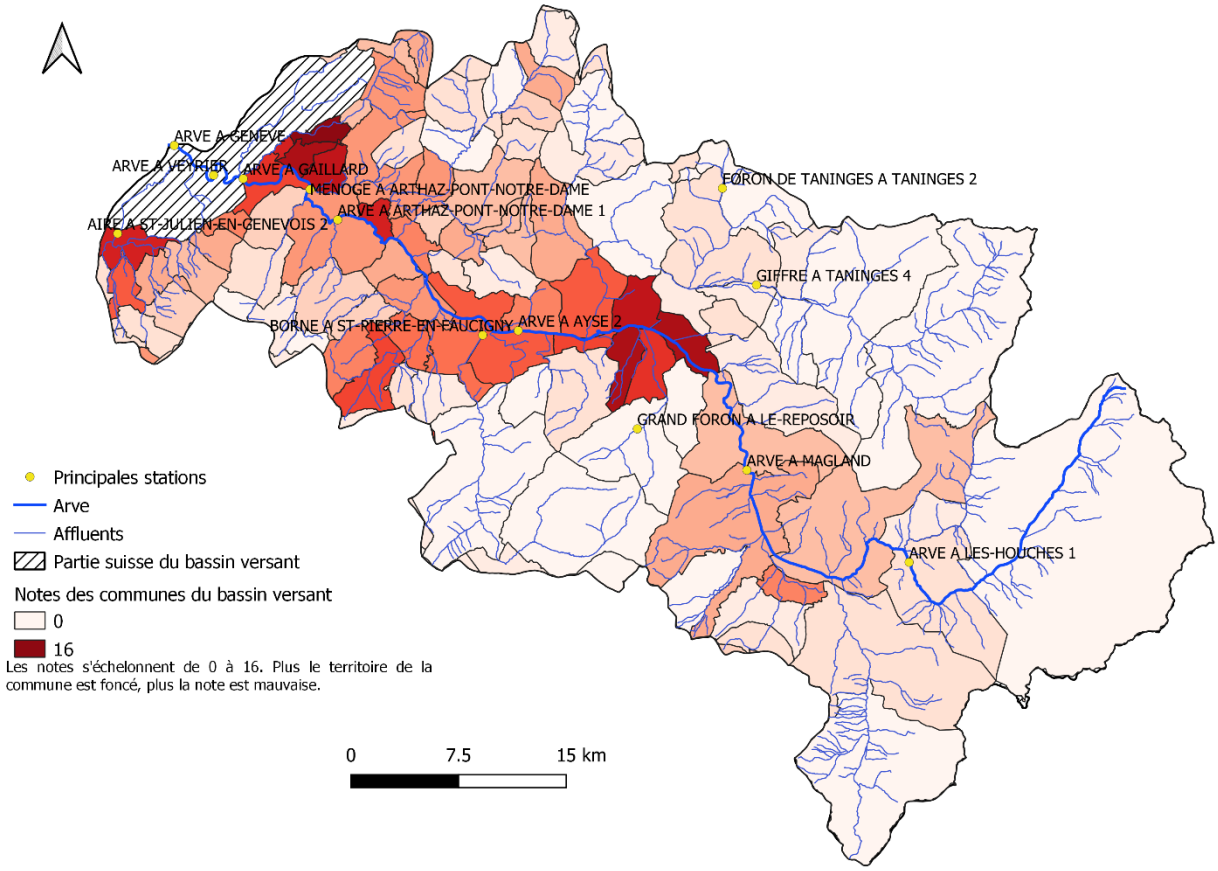


Figure 11 : Territoires du bassin de l'Arve les plus exposés aux pollutions d'origine anthropique. D'après la densité de population, de sites ICPE, BASOL et BASIAS

Sur cette figure sont également représentés les stations de prélèvements les plus suivies. Aucune de ces stations n'est située dans les zones aux plus mauvaises notes et très rarement à leur aval immédiat. Ce sont donc d'autres critères qui ont conduit les maîtrises d'ouvrages en charge du suivi de la qualité des eaux à choisir ces stations à moins que les paramètres aient été pondérés différemment. Par exemple, les maîtrises d'ouvrage peuvent avoir donné plus d'importance à la densité (voir figure 12) qui reflète les rejets d'eau usées et le niveau d'exposition de la population.

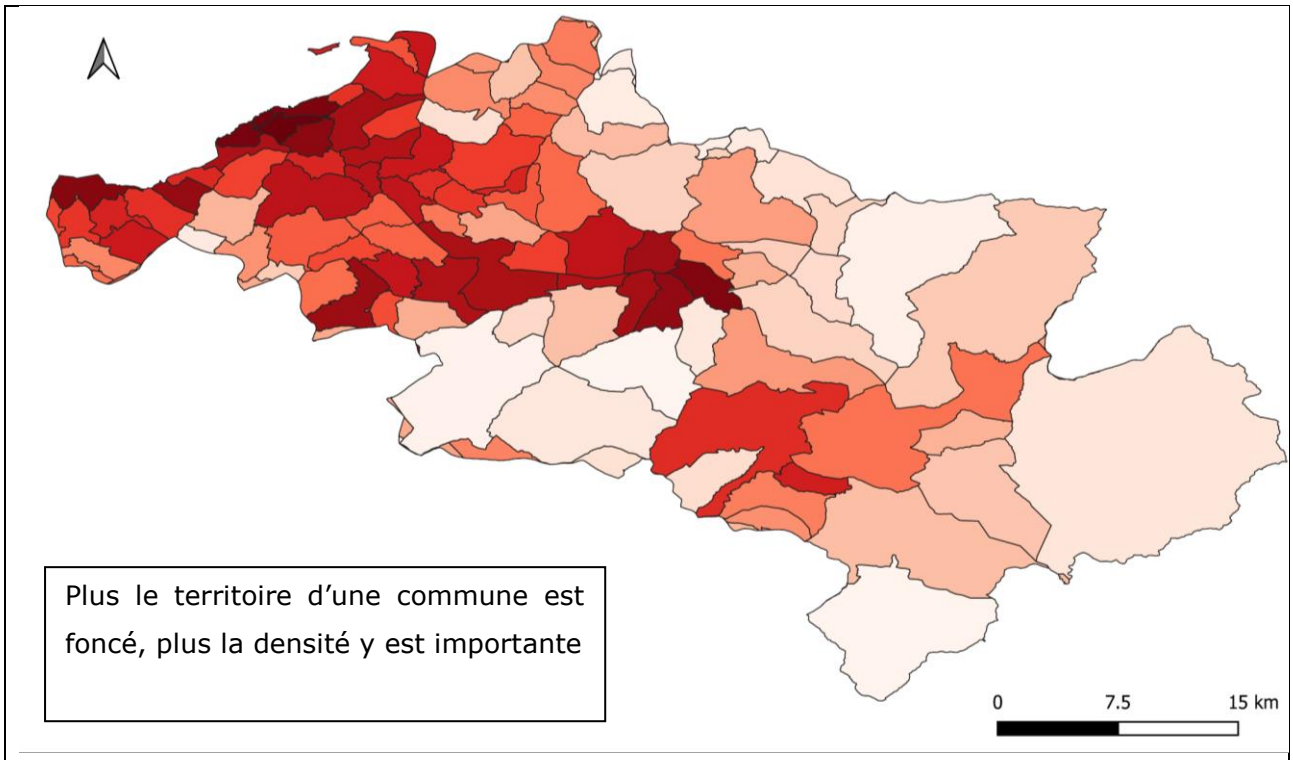


Figure 12 : Densité des communes du bassin versant français de l'Arve d'après les données INSEE de 2017

3.1.5 La mise en place progressive d'infrastructures de gestion de l'eau

Alors que la mise en place d'un réseau d'assainissement est un coût important pour une collectivité, l'installation de nouvelles stations d'épuration (STEP) se traduit-elle par une amélioration de l'état des rivières qui irrigue le bassin versant de l'Arve ? On pourrait également se poser la question pour les stations industrielles mais, malgré nos demandes, les données n'ont pas pu nous être communiquées par l'AERM&C du fait de leur confidentialité.

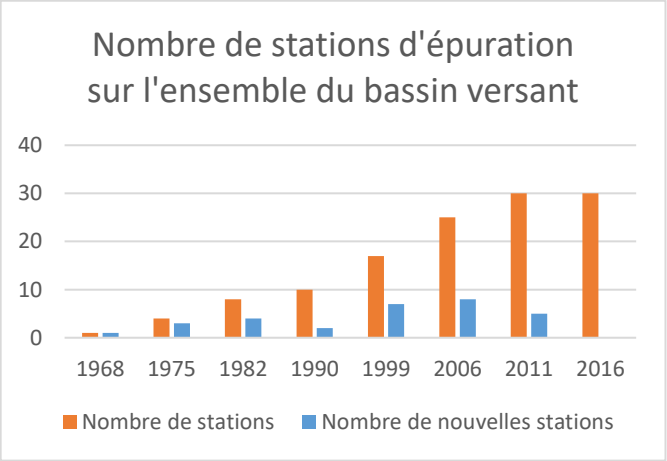


Figure 13 : Évolution du nombre de STEP dans le bassin versant de l'Arve français

Les premières stations d'épuration ont été mises en service à la fin des années 60[22] et leur nombre a crû rapidement avec une accélération dans les années 90 (Figure 13) pour atteindre le nombre actuel à la fin des années 2000.

En lien avec le nombre de stations, la capacité (en équivalent habitant) a connu une croissance similaire. Dès la fin des années 2000 la capacité théorique de ces installations est supérieure au nombre d'habitants du bassin versant (Figure 14). On peut donc supposer qu'une majorité des eaux usées du bassin de l'Arve soient traitées, ceci à condition que les rejets soient effectivement connectés à une STEP domestique. Pour des raisons techniques ou simplement de coûts il est possible qu'une partie des eaux usées collectées soient envoyées hors du bassin ou, qu'au contraire, des apports extérieurs se fassent. De telles « échanges » sont vraisemblables pour les communes en limites de bassin versant surtout si les STEP du bassin sont éloignées. En effet, le sud du bassin est largement dépourvu de STEP (cf. carte en annexe 2). En outre, ces mêmes chiffres ne tiennent pas compte des variations communales et infra-communales.

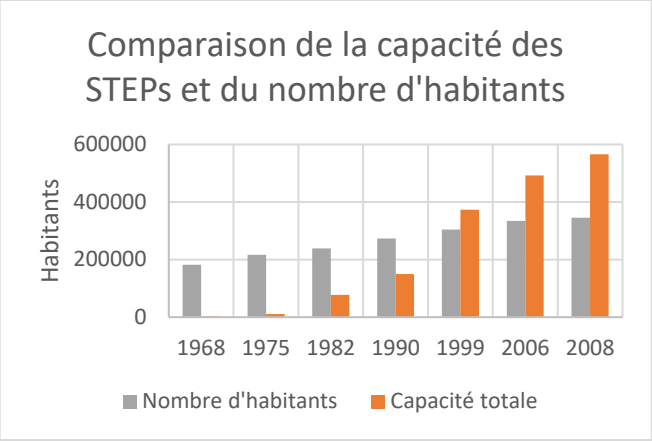


Figure 14 : Comparaison capacités des STEPS du bassin versant et nombre d'habitants

L'analyse réalisée à l'échelle des agglomérations (Figure 15) montre que certaines communes ont une capacité de traitement des STEP inférieure à leur population tandis que d'autres ont un solde très positif, comme Samoëns ou Sallanches. Il est peu probable que toutes les stations en défaut soient raccordées aux stations excédentaires compte tenu des coûts pour la mise en place d'un tel réseau, nécessairement renchéris par l'éloignement de certaines communes et par une topographie parfois complexe. En outre, à l'intérieur même des territoires communaux, certains quartiers ou certaines zones, notamment en habitats dispersés, ne sont pas raccordés au réseau d'assainissement. Dans ce cas, la réglementation oblige les habitants à mettre en place un système d'assainissement non collectif, comme pour la communauté de communes de Cluses ("Assainissement non collectif," n.d.).

[22] La STEP de BOGEVE date de 1968.

Quant à la capacité très excédentaire de certaines stations, on peut s'en étonner. D'une manière générale, la gestion des finances des collectivités ne permet pas l'acquisition d'une infrastructure surdimensionnée, à plus du double du besoin théorique à Samoëns par exemple. C'est oublier là l'importance du tourisme et en particulier le tourisme de sports d'hiver. En effet, les cinq stations ayant la différence de capacité la plus importante (Samoëns, Sallanches, Chamonix, Roche-sur-Foron, Cluses) possèdent sur leur territoire des stations de ski. Il est probable que la capacité des stations ait été adaptée à la pression touristique saisonnière. Par exemple, la

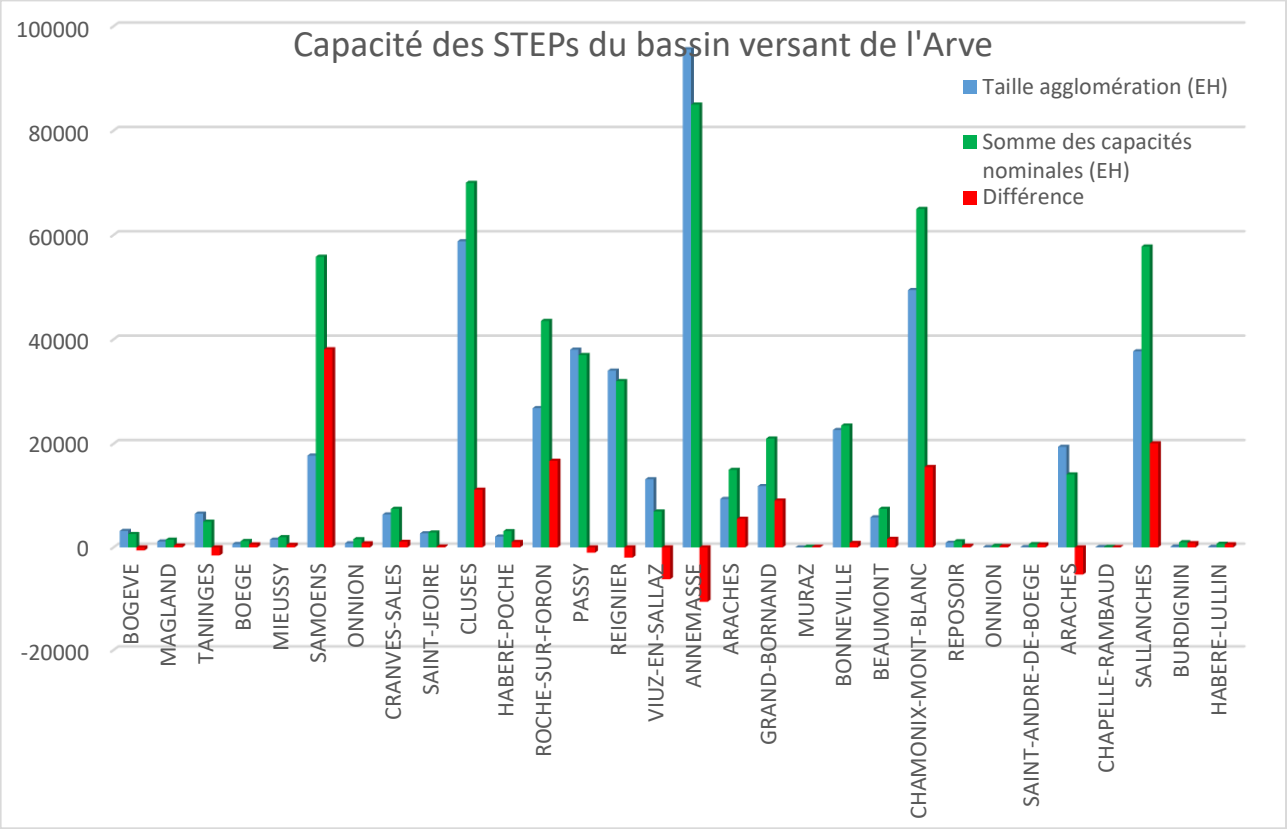


Figure 15 : Comparaison capacité des STEP et population de leur agglomération

communauté de communes de Sallanches a accueilli 3201450 nuitées lors de la saison hivernale 2018/2019 ("Observatoire touristique," n.d.). Si l'on considère que la saison de ski dure 120 jours[23], on arrive à une population non permanente complémentaire d'au moins 26650 personnes par jour en moyenne. On dépasse alors la capacité théorique de la station d'épuration.

Même si le bilan semble très positif quant au traitement des eaux, un regard plus fin permet de nuancer et de mettre en évidence quelques limites du réseau d'assainissement actuel. Malgré tout, le développement de ce réseau paraît bénéfique à l'amélioration des eaux de surface, comme le montre l'évolution temporelle de la concentration de certains paramètres comme le

[23] Du 16 Décembre au 15 Avril.

DBO5 et le phosphore[24]. Par exemple, à la station de Pont Notre Dame à Arthaz, la concentration de ces paramètres diminue sur la période 1981-2019 (Figure 16). De plus, l'application Hype détecte un changement de moyenne aux environs de l'année 2004 (cf annexe 3) qui demeure sans explication apparente et que l'on retrouve pour d'autres polluants comme nous le verrons plus loin.

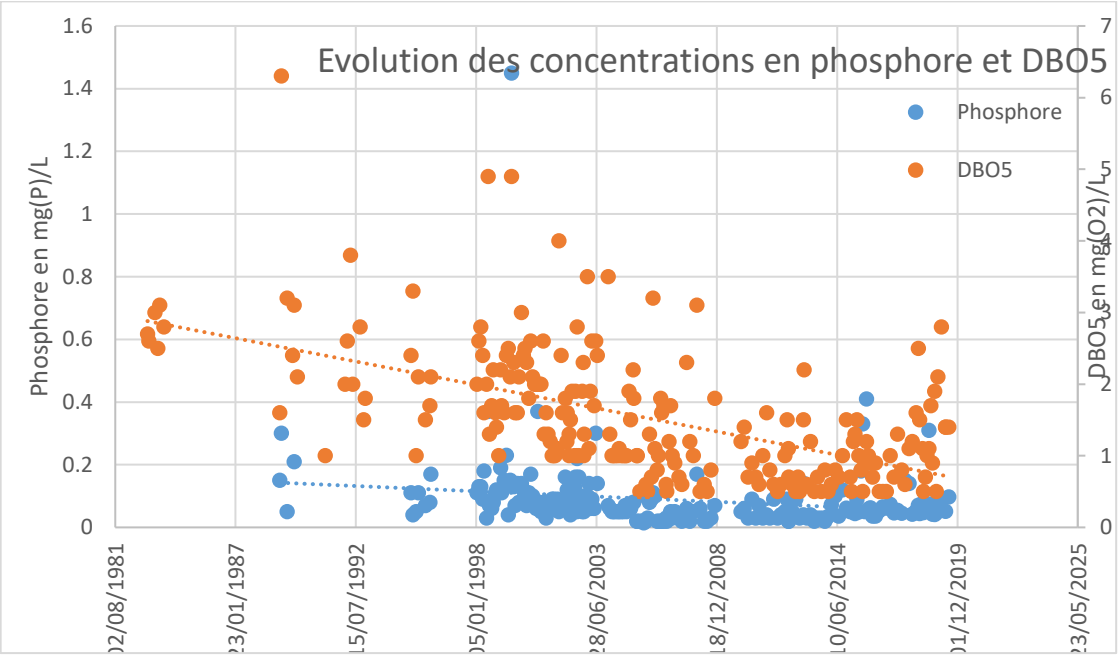


Figure 16 : Évolution temporelle des concentrations en phosphore et DBO5 dans les eaux de surface à la station de Pont-Notre-Dame à Arthaz

3.2 Les sédiments : témoins d'une évolution positive de l'Arve ?

La priorité donnée aux sédiments dans ce travail s'explique par la difficulté à mener de front une étude de l'ensemble des supports et par l'intérêt spécifique qu'offrent celle des sédiments. À l'opposé de l'analyse chimique de l'eau, qui renseigne sur l'état du cours d'eau au moment de la mesure, les sédiments donne une information plus intégratrice, sur une plage temporelle plus étendue.

Le choix de s'appuyer essentiellement sur les sédiments superficiels dans ce travail, outre la volonté d'avoir un support intégrateur dans le temps, est lié au nombre de données disponibles. En effet, le nombre de stations où les bryophytes ont été prélevés est sensiblement identiques au nombre de stations de prélèvements de sédiments[25] mais ces prélèvements sont nettement

[24] La DCO, la DBO5, l'azote et le phosphore total sont des marqueurs du traitement des eaux usées (Carre, 2018).

[25] 29 stations pour les sédiments contre 21 pour les bryophytes.

moins nombreux[26]. Quant aux autres supports les prélèvements se limitent qu'à quelques stations et sont occasionnels, comme pour les MES (1994 et 2000) ou les gammares (à partir de 1998). Tout ceci conduit à privilégier les sédiments superficiels comme support d'étude même si l'étude des bryophytes pourra apporter des compléments. En particulier, les données sédimentaires sont assez récentes et ne permettent pas d'avoir un regard sur la période antérieure à 1998, alors que les données bryophytes remontent à 1988 pour certaines.

Les sédiments de surface sont collectés une fois par an, de préférence en condition d'étiage afin de permettre le prélèvement de sédiments fins, comme en témoigne la Figure 17.

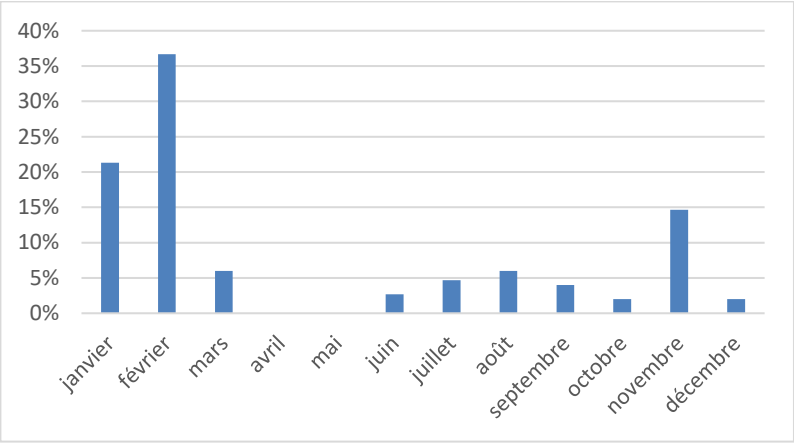


Figure 17 : Pourcentage des prélèvements sédimentaires selon le mois de l'année

Dans le chapitre 1.1, nous avons rappelé l'aspect dominant du régime glaciaire dans la vallée de l'Arve, qui se traduit par un étiage en hiver et une période de hautes eaux en été. C'est donc a priori en hiver que doivent avoir lieu les prélèvements et c'est ce qui est confirmé par nos données (les trois mois de l'hiver représentent 60% des échantillonnages). Les prélèvements hors hiver peuvent certainement s'expliquer par la variabilité des régimes des différents affluents de l'Arve déjà évoquée plus haut et des besoins plus ponctuels de mesures.

3.2.1 Le choix des stations

Le choix du support effectué, il reste à choisir les stations à privilégier dans le cadre de cette étude. En effet, même réduit à 29 stations pour les sédiments, ce nombre est encore trop important. En outre, pour beaucoup de stations le nombre de prélèvements est limité. Seules quatre stations ont dix prélèvements ou plus. Au final, cinq stations ont été retenues. Ce choix est basé sur deux critères : le nombre de prélèvements et la position des stations sur l'Arve. Le fait qu'elles soient sur le même cours d'eau permet d'évaluer les éventuels gradients amont-aval.

[26] 66 prélèvements pour les bryophytes au total et 138 pour les sédiments si l'on ne considère les 21 stations les plus utilisées.

Tableau 5 : Liste des stations utilisées pour l'étude sur l'évolution de la pollution des sédiments de l'Arve

Code station	Nom de la station	Nom employé dans le reste du document	Nombre de prélèvements
6063900	ARVE A ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME 1	Pont-Notre-Dame	22
6061000	ARVE A MAGLAND	Magland	18
6060000	ARVE A LES-HOUCHES 1	Les Houches	13
6063300	ARVE A AYSE 2	Ayse	10
6999119	ARVE A VEYRIER	Veyrier	5

Les quatre premières stations répondent parfaitement aux deux critères. Il s'agit des stations offrant le plus grand nombre de prélèvements et, comme on peut le voir sur la Figure 18, elles sont également bien réparties le long de l'Arve. La dernière station, celle de Veyrier, ne remplit pas la condition sur la dimension des jeux de données (avec au moins dix prélèvements) mais il s'agit dans ce cas d'avoir une station le plus à l'aval possible de l'Arve avec le maximum de données. C'est cette dernière station qui offrait donc le meilleur compromis entre situation géographique et nombre de données.

Figure 18 : Carte des stations principales utilisées pour l'évolution de la pollution des sédiments de l'Arve

3.2.2 Les paramètres étudiés

Pour les sédiments, au contraire des bryophytes[27], plusieurs centaines de paramètres sont suivis dans les fichiers naïades étudiés[28]. Parmi tous ces paramètres, un nombre restreint a été retenu afin que ce travail puisse tenir dans la durée du stage. Le choix a été guidé par la typologie du territoire, c'est-à-dire un espace marqué par l'industrie, le travail des métaux et un important trafic routier (voir 1.2). Nous avons retenu 8 éléments traces-métalliques (ETM), 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et, initialement, les polychlorobiphényles (PCB). Cependant, le travail sur les PCB s'est avéré être d'un moindre intérêt, l'immense majorité des mesures étant aux LQ. Par exemple, sur le site de Pont-Notre-Dame, pour 324 mesures tous PCB confondus seules 17 mesures dépassent la LQ, et à Magland, seules 10 mesures pour un total de 270 dépassent la LQ (par exemple pour le PCB101, 2 mesures exploitables – voir annexe 4). Ceci représente pour ces deux sites 5% et 4% du total des mesures. Les données sont donc trop peu nombreuses pour permettre de les exploiter. L'étude des PCB a donc été abandonnée. Sur ce point, même si l'on se gardera d'affirmer l'absence de problématique avec les PCB, cela ne semble pas constituer un problème majeur pour le territoire depuis 1998 et le début des relevés sédimentaires utilisés dans notre étude. Un constat similaire, sur la faiblesse des niveaux de concentrations en PCB de l'Arve et de son bassin, peut être fait à partir de la carte (annexe 8) produite par la DREAL Rhône-Alpes (Noars and Bourg, 2013).

3.2.2.1 Les éléments trace métalliques

Les métaux sont naturellement présents dans les sols et leur présence impacte les concentrations dans les masses d'eau et les sédiments. Même si ces apports naturels ne doivent pas être négligés (Noars and Bourg, 2013) et peuvent être pris en compte lorsque les concentrations mesurées sont supérieures aux Normes de Qualité Environnementale (NQE) définies dans la Directive Cadre sur l'eau (DCE) (*CE*, 2008) pour les masses d'eau, la qualité et le faible nombre de données sur les fonds géochimiques fait qu'il « est loin d'être évident » de disposer d'informations fiables (Noars and Bourg, 2013). En ce qui concerne notre territoire d'étude, il semble exister assez peu de données. Malgré tout, quelques rares éléments d'information sont disponibles dans la littérature. Il en ressort que l'arsenic et le fluor sont très présents naturellement dans le massif du Mont-Blanc et donc en tête de notre bassin versant de l'Arve. Ainsi, les sources du massif du Mont-Blanc auraient des concentrations variant de 0 à 10µg/L (Sonney et al., 2005) pour l'Arsenic, quand les autres ETM seraient majoritairement d'origine anthropique même s'ils sont bien évidemment présents naturellement (Salminen et al.,

---

[27] Pour les bryophytes seuls 8 ETM sont supervisés (Arsenic, Cadmium, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc)

[28] A la station de Pont-Notre-Dame ce sont 527 paramètres qui sont surveillés.

2005). Enfin, le cadmium a une concentration comprise entre 0,25 et 0,35 mg/kg pour les sols agricoles de la vallée (voir annexe 5).

Les ETM retenus sont au nombre de 8, il s'agit de l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn). Ces métaux sont parmi les plus recherchés (Noars and Bourg, 2013) ; quatre d'entre eux (Cd, Hg, Ni, Pb) sont classés comme substances prioritaires de la DCE et les quatre autres sont classés comme polluants spécifiques de l'état écologique des eaux de surface[29]. Autre intérêt de ces ETM, ils sont mesurés dès l'origine des prélèvements sédimentaires, au contraire du fer (Fe) par exemple (début en 2010). Ils sont également mesurés dans les bryophytes, ce qui permet d'avoir une vision complémentaire appréciable.

3.2.2.2 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les HAP sont des micropolluants organiques et constitués de plusieurs cycles benzéniques. Ils peuvent avoir trois origines différentes :

- Pyrolytique : les composés se forment lors de la combustion partielle de matière organique ou du fait d'activités humaines, comme l'industrie, la métallurgie, l'incinération des déchets, le transport routier via la combustion du carburant et le chauffage domestique autre qu'électrique. « Cette source est responsable de la majorité des émissions diffuses de HAP » (Poulier et al., 2017).
- Pétrogénique : les HAP sont issus de bruts pétroliers et de leurs dérivés. Les émissions peuvent provenir de rejets d'huiles minérales (huile, essence, créosote…) et ont souvent une moindre dispersion.
- Diagénétique : C'est-à-dire lors de la transformation de sédiments en pétrole.

L'origine des HAP peut être naturelle (diagénèse, feux de forêts, volcanisme) mais leur présence dans l'environnement est essentiellement due aux activités humaines (Botta et al., 2014).

La DCE (CE, 2013) impose en effet de suivre un certain nombre de ces composés au titre des substances prioritaires pour l'anthracène, le fluoranthène et le naphtalène (Annexe 1) ou au titre du suivi de la qualité environnementale (Annexe 2 partie A) pour le benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(ghi)pérylène et l'indéno(1,2,3cd) pyrène outre les trois précédemment cités. Ces 8 polluants font partie des HAP les plus suivis et que l'on retrouve dans la fiche SEQ eau (SEQ-eau V2, 2003). Cette liste est complétée dans la fiche SEQ eau par l'acénaphtène, acénaphtylène, benzo(a)anthracène, chrysène,

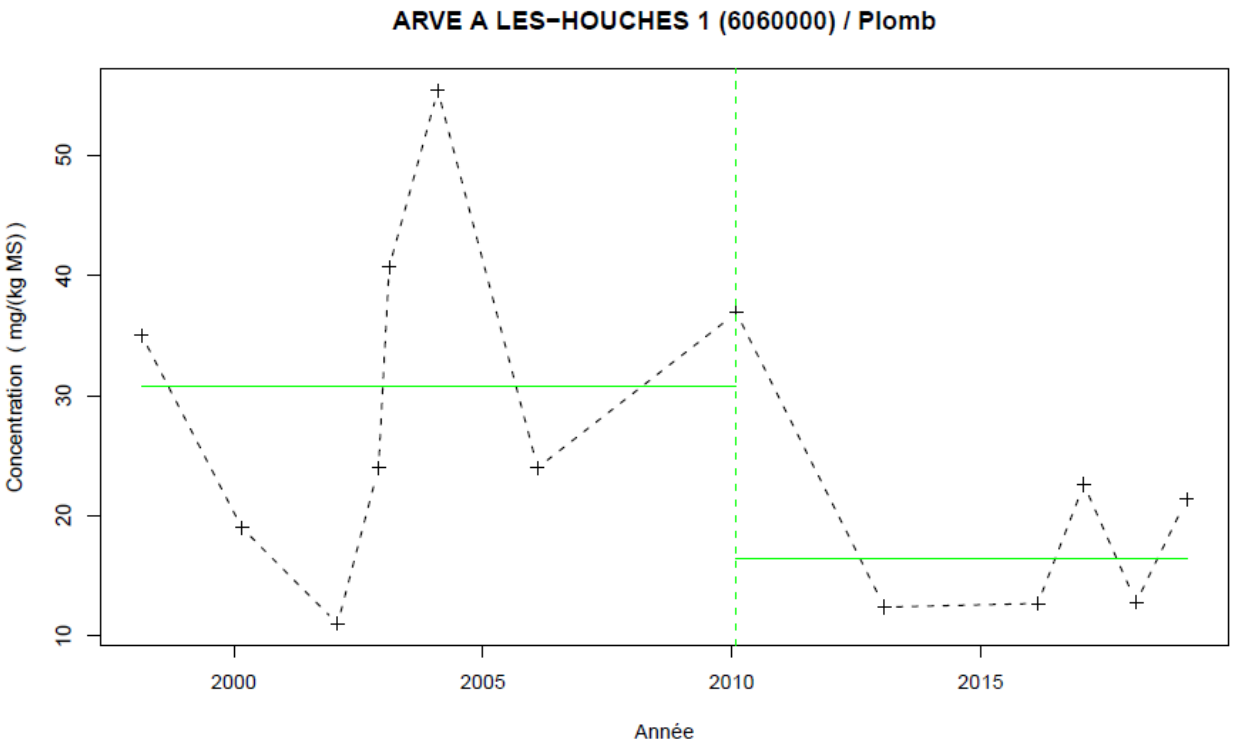
[29] Voir annexe 2 de l'arrêté du 25 janvier 2010 (Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement - version consolidée du 28 juin 2010, 2010).

dibenzo(a,h)anthracène, fluorène, phénanthrène, pyrène. Ces 16 composés ont des propriétés différentes qui vont influer sur leur solubilité ou leur masse (voir annexe 10).

3.3 Exploitation des données et analyses

3.3.1 Les éléments traces métalliques

Pour étudier les l'évolution temporelle des concentrations en ETM dans les sédiments pour les stations étudiées, une première approche a été d'utiliser Hype. Comme expliqué plus haut, Hype permet de calculer une date de changement de moyenne et les moyennes avant et après cette date comme on peut le voir avec la Figure 19. Le Tableau 6 donne les résultats obtenus par l'outil quand des valeurs ont pu être déterminées. On constate une amélioration globale de la situation même si pour certaines stations et concernant certains métaux on observe à l'inverse une dégradation. En effet, les moyennes de concentrations diminuent sauf pour le chrome aux Houches et à Magland et le zinc et l'arsenic à Ayse. Pour Ayse, les données étant récentes, il est difficile de savoir s'il s'agit d'une tendance de fond, ou un biais lié au faible nombre de données.



Légende

- - - · Série temporelle
+ Valeur > LQ
o Valeur <LQ, <LD, traces...
- - - Date de changement de moyenne
—— Moyenne avant/après rupture

Tendances identifiées sur la longueur totale de la chronique

Test	Pente	P-value
Mann-Kendall	Aucune tendance significative détectée	5e-01
Mann-Kendall modifié	Non effectué (pas assez de données)	
Régression linéaire	Aucune tendance significative détectée	1.7e-01

Ruptures identifiées

Test	Date	P-value
Changement de moyenne (Buishand)	03/02/2010	<0.05
Inversion de tendance	Test non effectué (pas assez de données)	

Moyenne des données avant/après rupture

	Moyenne
Avant rupture	30.75 mg/(kg MS)
Après rupture	16.38 mg/(kg MS)

Nombre de données : 13
Longueur de la chronique : 7665 jours (21 années)
Taux de quantification : 100 %

Données non autocorrélées

Données normalement distribuées
(pval-Shapiro= 1e-01)

Figure 19 : Exemple de résultats produits par Hype, le plomb à la station des Houches

Tableau 6 : Synthèse des résultats de Hype pour l'évolution des concentrations en ETM dans les sédiments, date de rupture et moyennes avant/après*

Station	ETM	Moyenne avant rupture en mg/(kg MS)	Moyenne après rupture en mg/(kg MS)	Tendance Mann-Kendall en mg/(kg MS)/an		Date de rupture
Les Houches	Arsenic	**61.35**	27.54	NA		05/02/2004
	Cadmium	**0.82**	0.18	−2.24e−02	↘	03/02/2010
	Chrome	33.56	**76.17**	NA (on voit une augmentation par régression linéaire)		24/01/2013
	Cuivre	**33.63**	12.4	−9.76e−01	↘	05/02/2004
	Mercure	**0.13**	0.02	−5.57e−03	↘	06/02/2006
	Nickel	**22.19**	10.24	NA		03/02/2010
	Plomb	**30.75**	16.38	NA		03/02/2010
	Zinc	**142**	64.7	NA		05/02/2004
Magland	Arsenic	**21.23**	13	−6.51e−01	↘	29/01/2002
	Cadmium	**0.58**	0.2	NA		06/02/2006
	Chrome	27.56	**49.59**	NA		27/11/2002
	Mercure	**0.09**	0.03	−2.73e−03	↘	12/02/2003
	Nickel	**26.69**	22.16	NA		29/01/2002
	Zinc	**116.04**	62.9	NA (on voit une augmentation par régression linéaire)		06/02/2006
	Plomb	**33.74**	21.22	NA		29/01/2002
Ayse (à partir de 2010)	Arsenic	6.98	**8.72**	NA		03/03/2014
	Zinc	34.7	**47.13**	NA		02/02/2012
Pont Notre Dame	Cadmium	**0.55**	0.2	−1.72e−02	↘	09/02/2005
	Cuivre	**32.87**	14.54	−1.68	↘	09/02/2005
	Mercure	**0.06**	0.02	−2e−03	↘	06/02/2006
	Nickel	**31.95**	19.79	−1.22	↘	09/02/2005
	Zinc	**98.12**	50.5	−3.36	↘	06/02/2006

* Seuls les couples stations/métaux pour lesquels Hype a pu donner des résultats sont ici présentés.

Pour pouvoir comparer les différentes stations le choix a été fait de scinder les chroniques en deux périodes et de les étudier distinctement, afin de répondre à deux problématiques en plus de comparer les concentrations dans le temps.

- l'étude temporelle des données avec l'outil Hype - ou par simple lecture graphique - montre souvent une rupture entre 2004 et 2006 selon l'ETM considéré et la station ;
- les stations n'ont pas la même ancienneté. Il est donc difficile de comparer des stations qui ont énormément de données anciennes (et des concentrations élevées) avec des stations qui n'ont que des données récentes dans un contexte où la situation générale semble s'améliorer.

Pour une plus grande simplicité de lecture, il a été décidé de scinder les diagrammes en boîtes à moustaches au passage 2005/2006. En outre, pour aider à interpréter les niveaux de concentrations, les valeurs sont comparées aux seuils bleu, vert et jaune définis dans la fiche SEQ eau version 2. En deçà du seuil bleu, la qualité de l'eau par rapport à un paramètre est considérée comme très bonne, bonne pour le seuil vert et passable pour le seuil jaune.

3.3.1.1 Arsenic

D'après la Figure 20, même si on remarque une baisse des concentrations, ce qui témoigne d'une amélioration de la situation, les niveaux en arsenic restent élevés dans certaines stations. En effet, pour l'essentiel, les concentrations en As dans les sédiments se situent au-delà du seuil vert (qui indique une aptitude à la biologie mauvaise) et le seuil jaune est même régulièrement dépassé aux Houches. Alors qu'on aurait pu penser que les niveaux augmenteraient dans les stations les plus à l'aval avec la pression anthropique, nous observons que les concentrations sont plus importantes dans les stations les plus à l'amont et que cette différence perdure dans le temps. En particulier à la station des Houches. De plus, sans parler de rupture on observe bien une inflexion dans les concentrations entre 2004-2006. L'importance de la concentration dans les stations à l'amont est liée au contexte géologique locale comme déjà expliqué page 44, avec un fond géochimique très marqué par l'As.

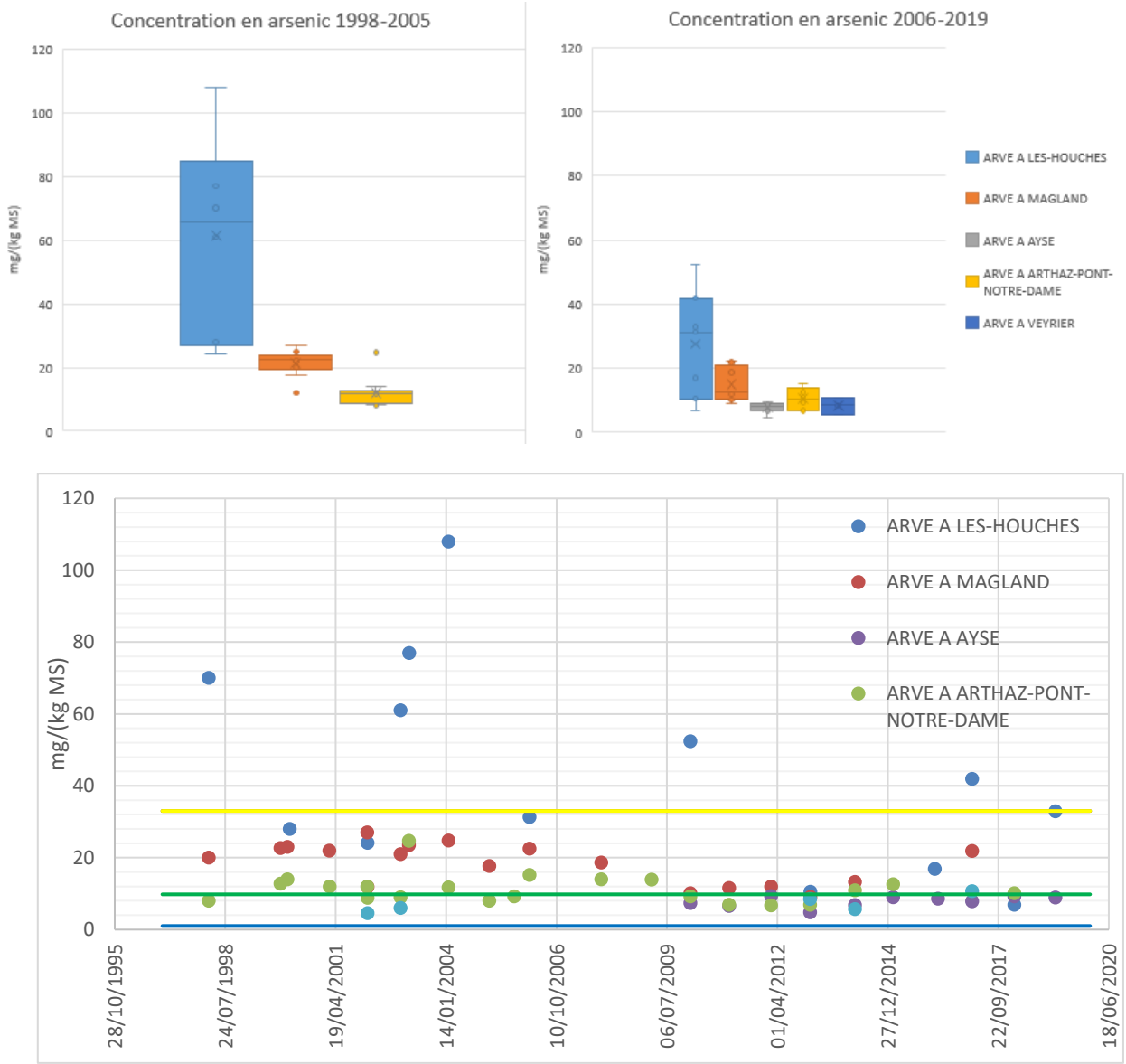


Figure 20 : Évolution dans le temps des concentrations en arsenic dans le bassin versant de l'Arve, comparaison des principales stations

3.3.1.2 Cadmium

Comme pour l'arsenic, l'amont est plus marqué (Figure 21). Les niveaux sont moins problématiques que pour l'arsenic et peu après 2004, et une nouvelle rupture, on observe une baisse significative des concentrations qui sont le plus souvent à la LQ, ce qui explique la droite horizontale. La LQ utilisée pose problème puisqu'il nous est impossible de dire si les concentrations sont inférieures, en pratique, au seuil bleu.

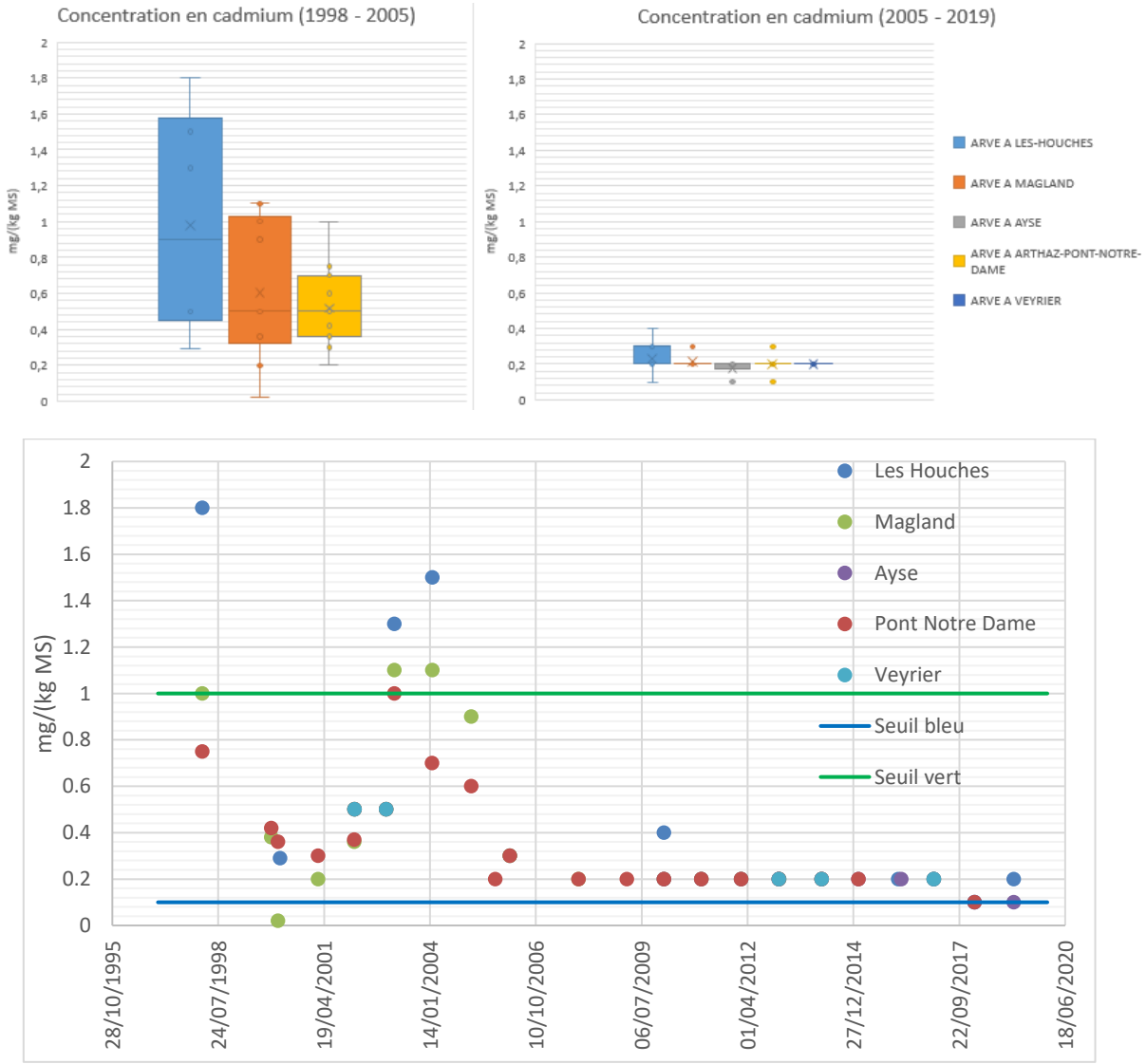


Figure 21 : Évolution dans le temps des concentrations en cadmium, comparaison des stations principales du bassin versant de l'Arve

3.3.1.3 Chrome

À la différence de l'As et du Cd, on ne retrouve pas de différence amont-aval flagrante (Figure 22), les médianes et concentrations moyennes des différentes stations sont très proches. Alors que pour le Cd et l'As on a une amélioration de la situation, elle est à la hausse pour le Cr et est peu favorable à la biologie (seuil vert souvent dépassé). Cette augmentation a été confirmée dans le tableau de synthèse Hype pour la station des Houches. Une éventuelle rupture entre

2004 et 2006 n'est pas facilement observable, on voit même une augmentation puis une diminution à la station des Houches après 2015.

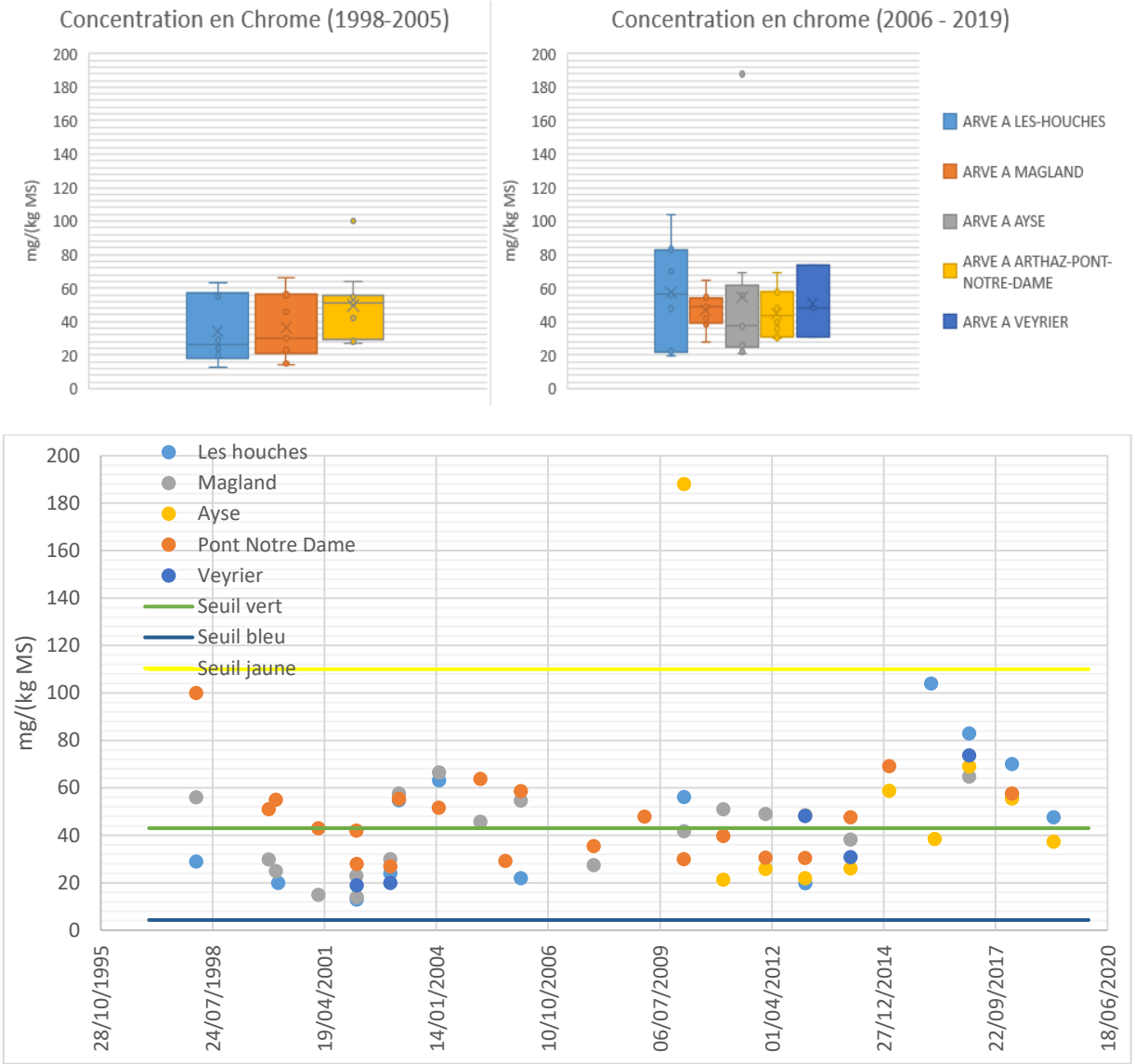


Figure 22 : Évolution dans le temps des concentrations en chrome, comparaison des stations principales du bassin versant de l'Arve

3.3.1.4 Cuivre

Pour le Cu, il n'existe pas de différence évidente entre l'amont et l'aval concernant les concentrations (Figure 23). Avant 2004-2006 environ la moitié des valeurs observées sont au-dessus du seuil vert et sont quasiment toutes en-deçà de ce seuil après 2006. Comme pour l'As et le Cd on tend vers une amélioration de la situation. Les mesures sont au-dessus de la limite de quantification au-dessus du seuil bleu il est donc impossible de savoir quel est l'état réel de l'Arve. La situation s'est donc améliorée au cours du temps et est bonne mais pas excellente, du moins on ne peut pas l'affirmer.

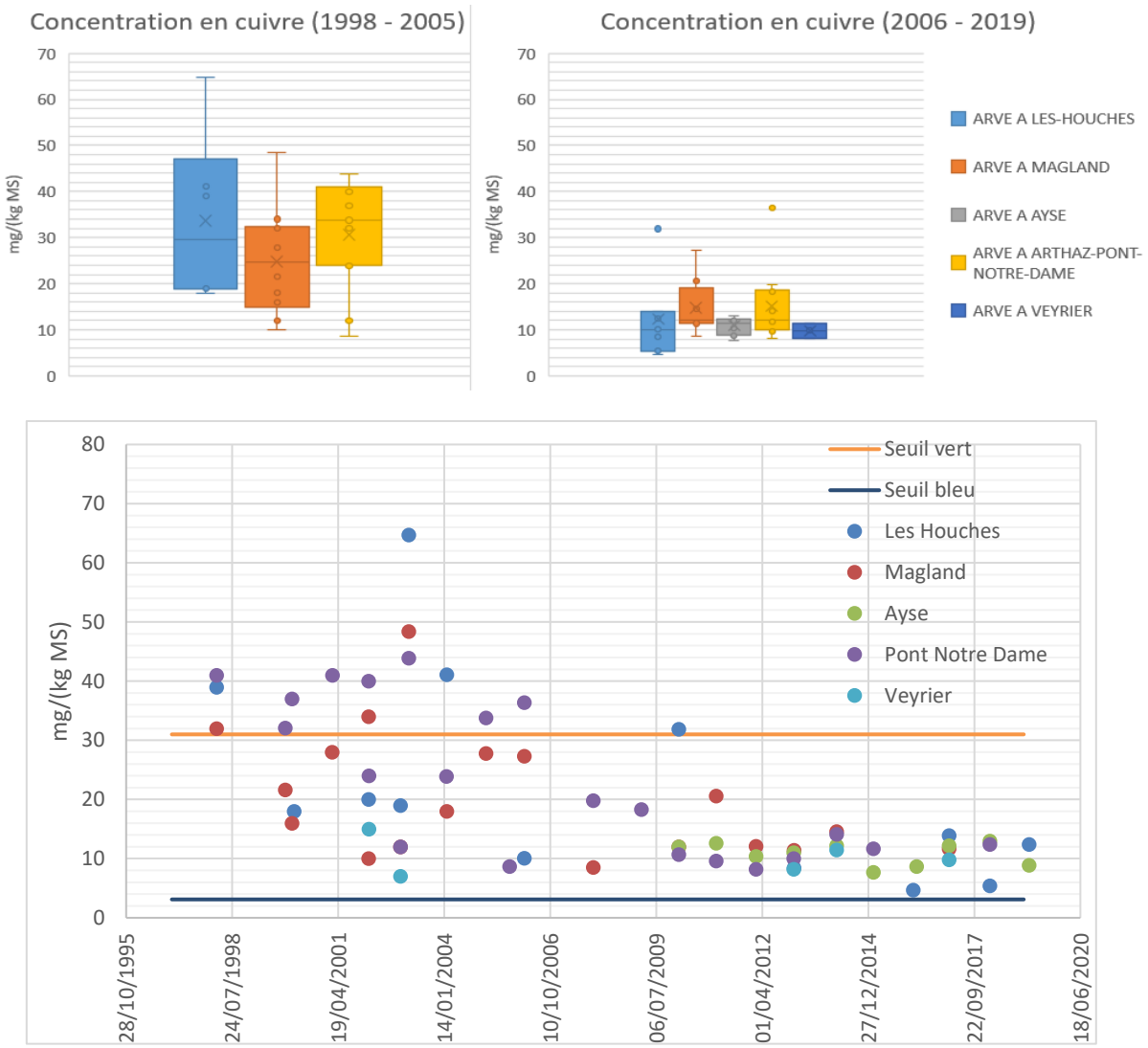


Figure 23 : Évolution dans le temps des concentrations en cuivre, comparaison des principales stations du bassin versant de l'Arve

3.3.1.5 Mercure

On retrouve sur la période 1998 – 2005 le rapport amont-aval (Figure 24). Concernant la deuxième période (2006-2019), les niveaux de concentration semblent assez homogènes entre les stations. On observe une nouvelle fois une « rupture » entre 2004 et 2006, avec un léger décalage dans le temps selon les stations. La rupture paraît se produire en 2004 pour Magland et Pont Notre Dame alors qu'elle se situerait en 2006 pour les Houches. Ajoutons que les concentrations sont comprises entre les seuils vert et bleu même s'il convient de tempérer cette affirmation puisque l'essentiel des valeurs après 2006 sont à la LQ.

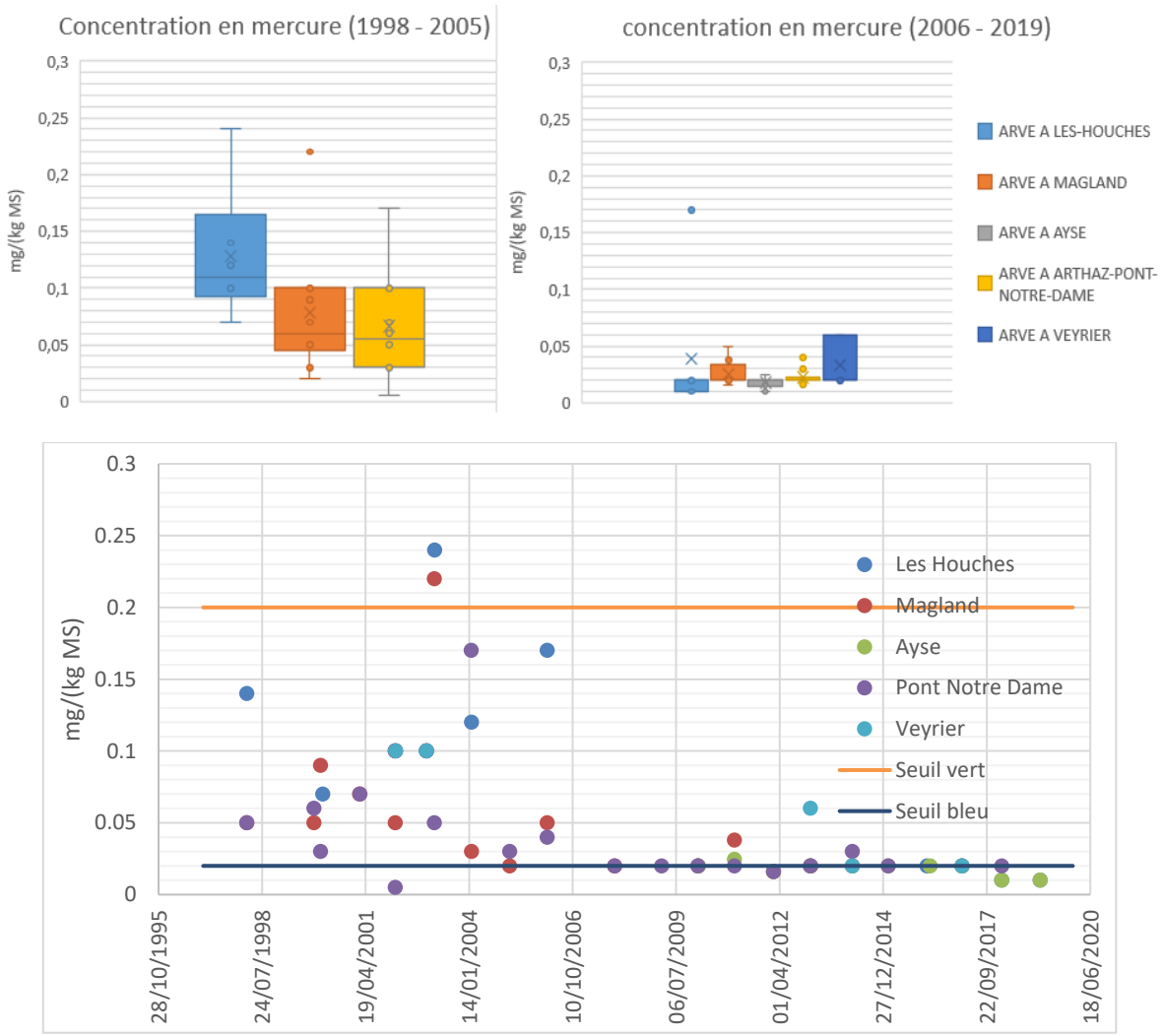


Figure 24 : Évolution dans le temps des concentrations en mercure, comparaison des principales stations du bassin versant de l'Arve

3.3.1.6 Nickel

Concernant le nickel, même si cela n'est pas franc au niveau des diagrammes en boîte, il semble que la tendance amont-aval soit inversée par rapport aux autres métaux déjà étudiés (Figure 25). Les niveaux de concentration sont assez élevés (seuil vert dépassé) et le demeurent après une phase de « rupture » moins nette que sur les graphiques précédents et qui interviendrait entre 2004 et 2006. Malgré tout, on note une amélioration de situation et une tendance globale à la baisse. Alors que sur la première moitié du graphique on a l'essentiel des valeurs au-dessus du seuil vert elles sont majoritairement en deçà dans la seconde.

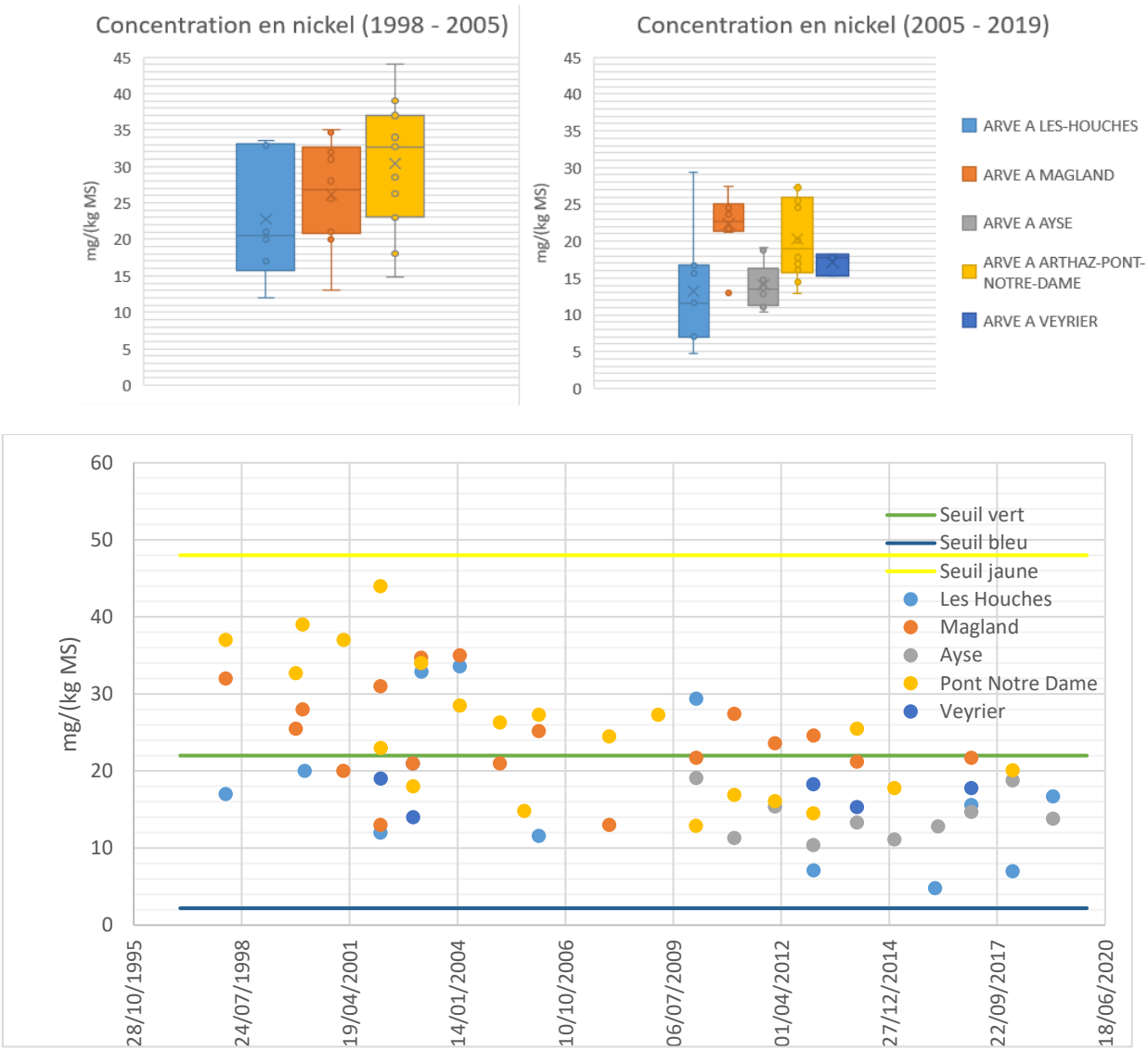


Figure 25 : Évolution dans le temps des concentrations en nickel, comparaison des principales stations du bassin versant de l'Arve

3.3.1.7 Plomb

Avec le plomb on retrouve le rapport amont-aval premièrement observé, c'est-à-dire une concentration plus importante à l'amont (Figure 26). On a encore une amélioration de la situation qui tend à se stabiliser avec des concentrations inférieures au seuil vert mais qui reste supérieures au seuil bleu (le seuil de quantification n'est pas atteint). La situation est donc bonne sans être idéale.

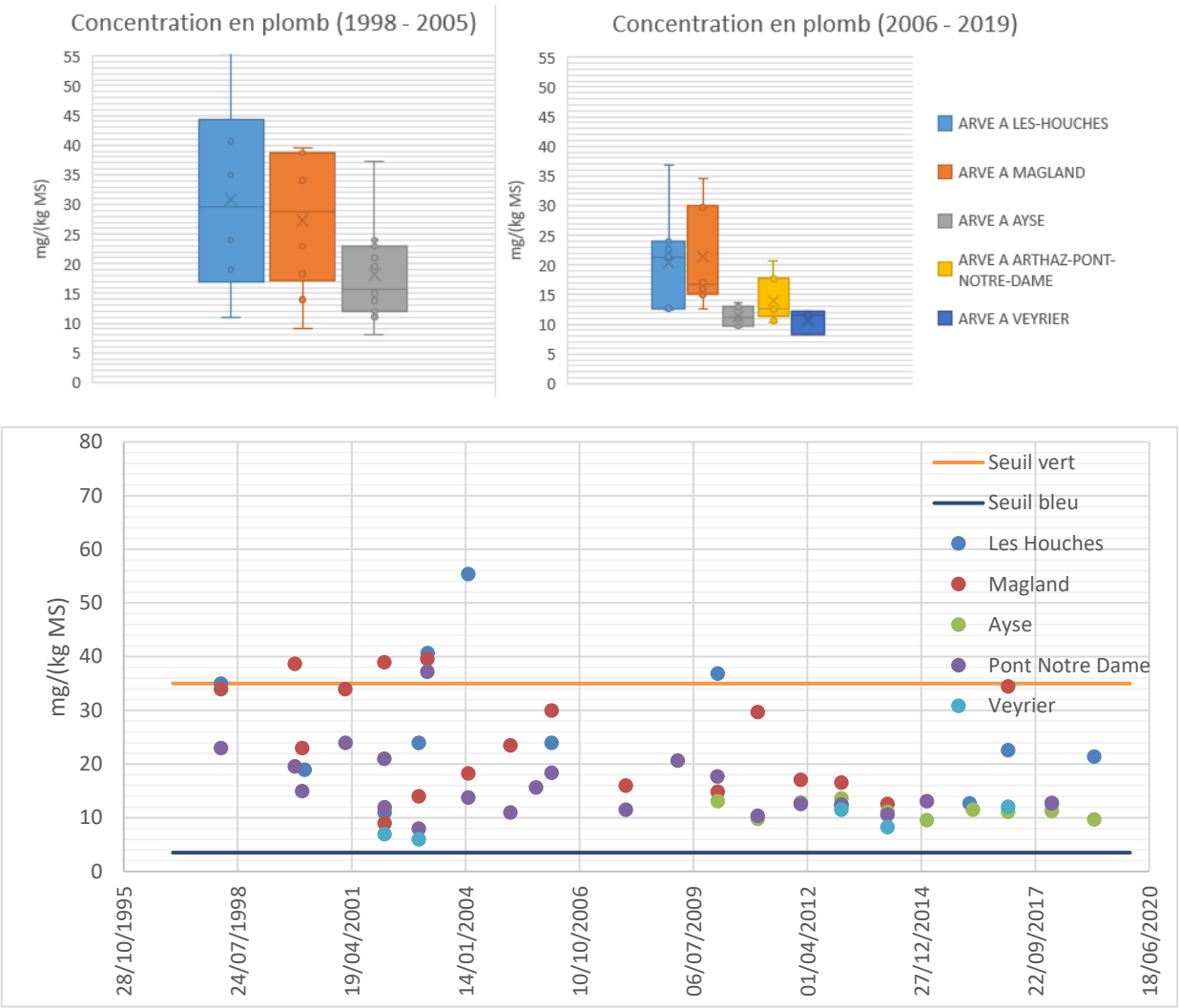


Figure 26 : Évolution dans le temps des concentrations en plomb, comparaison des principales stations du bassin versant de l'Arve

3.3.1.8 Zinc

Concernant le zinc, une nouvelle fois l'amont semble avoir des concentrations supérieures à celles de l'aval (Figure 27). On retrouve visuellement une rupture entre 2004 et 2006 également déterminée par Hype (voir Tableau 6 concernant les Houches et Pont Notre Dame). Sur une première partie on a une situation dégradée avec beaucoup de valeurs au-dessus du seuil vert alors que la deuxième partie est meilleure même si encore une fois on reste au-delà du seuil bleu.

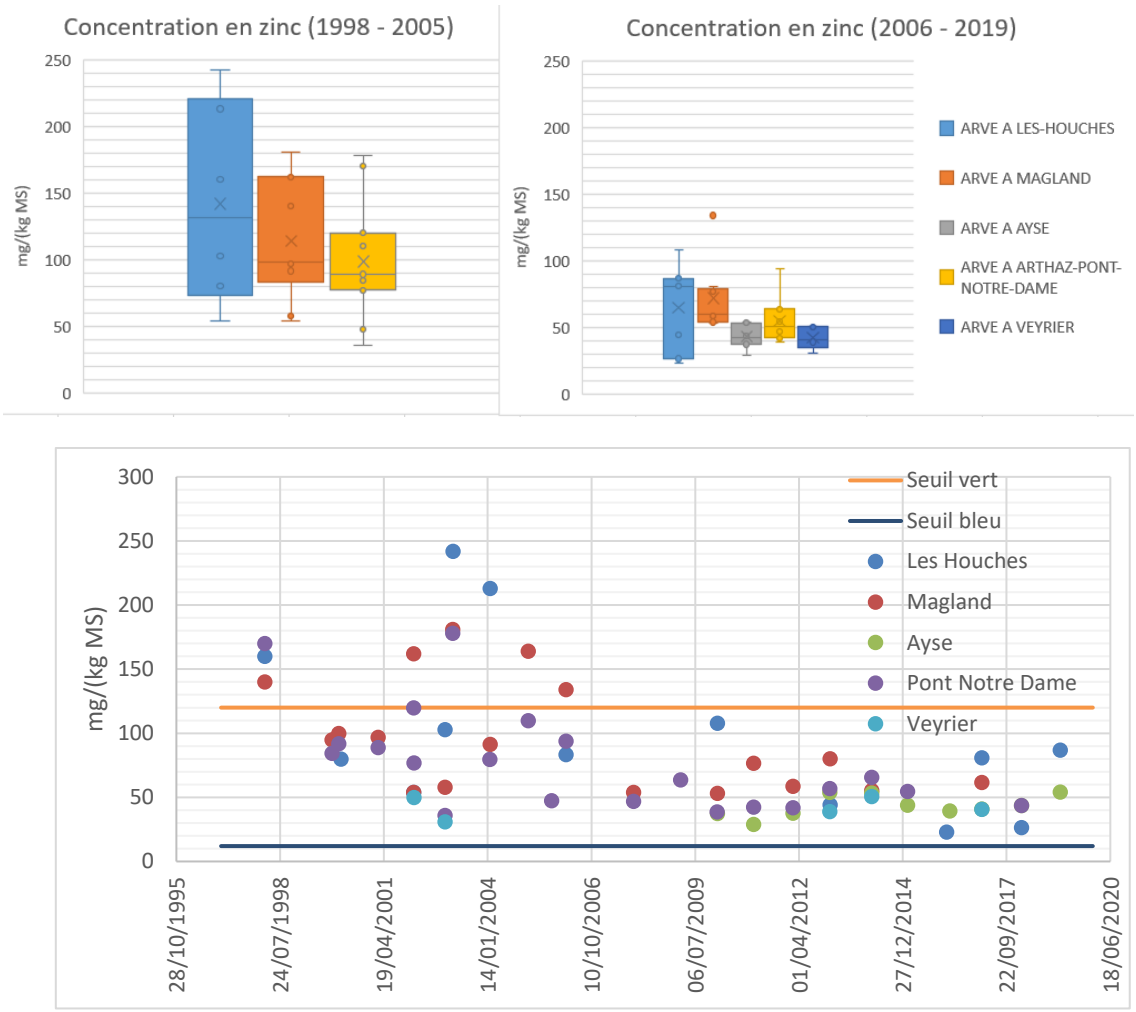


Figure 27 : Évolution dans le temps des concentrations en zinc, comparaison des principales stations du bassin versant de l'Arve

3.3.1.9 Analyse des observations faites sur les concentrations en ETM dans les sédiments

L'un des principaux enseignements tirés des niveaux de concentration des différents métaux dans les sédiments de l'Arve est que leurs concentrations sont globalement plus élevées à l'amont qu'à l'aval. Malgré toutes nos précautions quant à la qualité des données (origine, suppression des outliers avec un test de Grubbs) il reste difficile de l'affirmer car un paramètre n'a pas encore été pris en compte : la granulométrie des sédiments. En effet, selon leur granulométrie, les sédiments sont plus ou moins aptes à fixer les polluants par adsorption. Comme la granulométrie n'est pas indiquée dans les fichiers résultats utilisés il nous est impossible de juger de la capacité des sédiments des différents sites à capter les polluants. « Ainsi, la comparaison des données de contaminants entre stations ou au cours du temps nécessite d'écarter l'effet de la variabilité intrinsèque du sédiment, liée à son hétérogénéité spatiale sur une même station. C'est pourquoi, il s'avère nécessaire de normaliser l'ensemble des résultats dès lors que ces concentrations doivent être comparées entre elles, et notamment

dans le cadre d'une analyse de tendance » (Lionard et al., 2015). Le processus de normalisation, une fois les premières étapes de correction des données effectuées, nécessite de chercher un paramètre normalisateur. Dans un article l'article Yari et al. (2019), deux paramètres sont proposés : l'aluminium et le fer. Dans nos données, l'aluminium est le plus souvent à la LQ ce qui le rend inutilisable. Il reste donc le fer qui n'est surveillé qu'à partir de 2010, il n'est donc possible de normaliser qu'à partir de cette date.

Après avoir récupéré les données concernant le fer, il convient de supprimer les valeurs aux seuils de quantification pour les ETM puis de tester le niveau de corrélation entre la concentration en fer et celle des ETM. Ce test s'opère par le calcul du R^2 et de la P-valeur qui doivent être, respectivement, supérieur à 0,6 et inférieure à 0,05 pour indiquer un bon niveau de corrélation (voir Tableau 12 en annexe 15).

Il en ressort que six métaux ont un niveau de corrélation satisfaisant (ou proche de l'être) avec le fer : le cuivre, le plomb, le zinc et, de façon plus incertaine, l'arsenic et le nickel. Le cadmium a de très bonnes valeurs mais ceci est très certainement lié au nombre très limité de données (6) qui ont pu être exploitées (supérieures aux seuils de quantification). Ce test statistique peut être complété par une lecture graphique des résultats (voir annexe 12). Visuellement, quelques nuances sont à apporter aux résultats du tableau. Le zinc et le nickel ont une bonne régression linéaire avec une répartition le long de la droite de part et d'autre. Les valeurs calculées, à part pour les Houches, sont très concentrées dans un espace limité du graphique pour le Cu, l'As et le Pb, ce qui ne permet pas d'être affirmatif quant à la qualité de la régression linéaire.

Grace à ces deux contrôles, on peut raisonnablement utiliser la normalisation des données avec le nickel, le zinc et le plomb pour obtenir des graphiques (voir annexe 16), en appliquant la formule suivante : $C_{norm} = C_{polluant}/C_{fer}$

Il est difficile de sortir une grande tendance, on peut malgré tout faire quelques remarques. La première d'entre elles est que sur la dernière décennie les concentrations se sont stabilisées malgré quelques singularités. On ne remarque pas de rupture comme sur la décennie précédente. Les variations dans le temps sont assez parallèles ce qui peut témoigner d'une origine commune. Quant au rapport amont aval on retrouve les tendances déjà décrites c'est-à-dire un amont avec des concentrations en plomb et zinc plus importantes et l'inverse pour le nickel.

Grace à l'étude des sédiments on constate que la situation du bassin versant de l'Arve concernant les ETM a évolué favorablement lors des 20 dernières années. À la fin des années 90, sans être catastrophique, la situation était préoccupante avec des concentrations régulièrement supérieures au seuil vert de la fiche SEQ eau sauf pour le mercure. Au milieu des années 2000 une baisse rapide des niveaux de concentration a eu lieu. Enfin, la dernière décennie connait une relative stabilité. Le rapport amont aval, surprenant a priori, s'explique par la concentration naturelle dans le sol au pied du massif du Mont-Blanc pour l'arsenic. Quant à la rupture des années 2000, des éléments de réponse sont apportés par un rapport conservé par L'AERM&C

(LAEPS, 2011). D'après ce document, les émissions de chrome et de nickel sont dues aux activités de traitement des surfaces et de tribonification (polissage), celles de zinc et de cuivre également mais ces dernières seraient également liées aux bâtiments, aux routes et à la circulation automobile. La baisse constatée serait à imputer à trois facteurs, la fermeture des entreprises T2R (2006) et CAUX SCIONZIER (2009), la réduction de ses émissions[30] par la société HACER (ex Marquet) et la modification de certaines pratiques comme celles de l'entreprise Amphenol Socapex qui traite ses eaux avant de les envoyer dans le réseau d'assainissement alors qu'auparavant elle opérait un rejet direct dans le milieu naturel. Ces explications sont globalement convaincantes mais les entreprises mentionnées se situent à Cluses, au milieu du bassin versant, ce qui ne peut pas expliquer les tendances observées sur les sites amonts si ce n'est l'idée d'une modification généralisée des pratiques des industriels. On peut également envisager que l'évolution technique des automobiles et l'amélioration des carburants aient pu avoir un impact, comme on le verra plus loin pour l'évolution des HAP.

3.3.2 La situation avant 1998 des éléments traces métalliques dans l'Arve

Comme déjà explicité, les données sédimentaires commencent en 1998 dans Naïades il est donc nécessaire de chercher des données complémentaires pour remonter dans le temps. Nous disposons des données bryophytes et d'informations de la littérature scientifique (Wildi et al., 2006).

Dans un article de 2006, Walter Wildi donne les concentrations de métaux dans des carottes de sédiments prélevées dans le Rhône entre la confluence Arve-Rhône et le barrage de Verbois. La date de prélèvement des carottes n'est pas précisée mais il est probable qu'elle soit de peu antérieure à l'article. Le site de prélèvement le plus éloigné du barrage (Vs1) se situe environ 2km à l'aval de la confluence Arve-Rhône et est donc le moins susceptible de subir l'influence du barrage. Sachant que la profondeur du sédiment indique, en théorie, son ancienneté il en ressort malgré tout que les concentrations en ETM ont bien diminué dans le temps et qu'il semble qu'une rupture plus ancienne que celle précédemment évoquée ait eu lieu à l'horizon compris entre 120 et 100 cm de profondeur à l'exception du zinc. Malheureusement, l'auteur n'a pas pu dater les carottes ce qui nous empêche de déterminer une nouvelle date de rupture.

Les données bryophytes apportent un complément intéressant sur la temporalité même si seules deux stations parmi les cinq précédentes ont des données exploitables (Magland et Pont-Notre-Dame). Pour donner une vision sur l'ensemble du linéaire de l'Arve les données de la station de Marignier (dans la partie aval de l'Arve) ont complété ce corpus. Hype a pu être utilisé et le Tableau 7 synthétise les résultats qui montrent une nette amélioration à Pont-Notre-Dame et une tendance à la hausse à Magland. On remarque également que contrairement aux sédiments,

[30] Au cours des années 2000, la société est passée de 700 kg à 350kg de Ni/an.

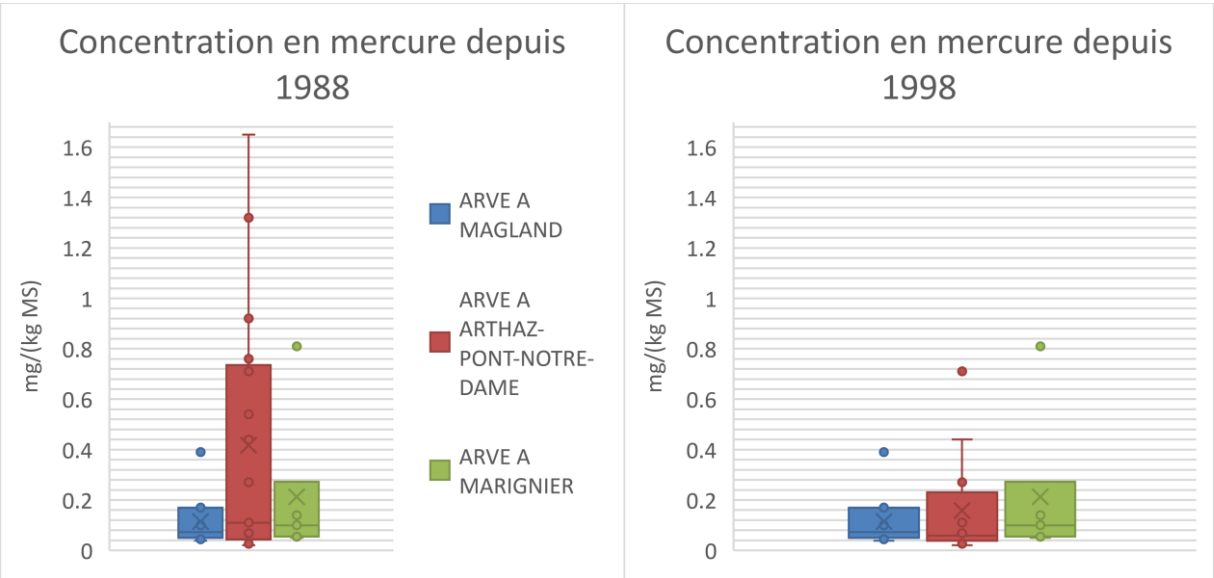
dans le support bryophytes les ETM semblent plus présents à l'aval. Hype détecte également une rupture mais qui intervient plus tôt, à la fin des années 90 à Pont-Notre-Dame, qui est la seule station à avoir des données antérieures à 1998 (début en 1988).

Tableau 7 : Synthèse des résultats de Hype sur l'évolution des concentrations des ETM dans les bryophytes, date de rupture et moyennes avant/après*

Station	ETM	Moyenne avant rupture en mg/(kg MS)	Moyenne après rupture en mg/(kg MS)	Tendance Mann-Kendall en mg/(kg MS)/an		Date de rupture
Magland	Arsenic	9.36	**20.78**	1.36	↗	29/01/2002
	Cadmium	NA		2.92e−01	↗	NA
	Nickel	13.72	**28.27**	2.75	↗	29/01/2002
	Plomb	23.5	**35.02**	NA		29/01/2002
	Zinc	NA		3.31e+01	↗	NA
Pont-Notre-Dame	Cadmium	**21.83**	0.64	−1.95e−01	↘	07/12/1999
	Chrome	NA		−1.54	↘	NA
	Mercure	**0.75**	0.05	−5.76e−02	↘	22/02/2001
	Nickel	**378.33**	76.46	-8.27	↘	17/12/1998
	Zinc	**1193.57**	252.6	−5.72e+01	↘	07/12/1999
	Plomb	**60.17**	16.35	−2.67	↘	17/12/1998
	Cuivre	**458.83**	85.57	−2.19e+01	↘	17/12/1998
Marignier	NA (pas suffisamment de données)					

* Seuls les couples stations/métaux pour lesquels Hype a pu donner des résultats sont ici présentés.

On peut suivre graphiquement l'évolution des différents ETM au cours du temps et comparer la situation entre les stations. Pour chaque ETM, il y a une boîte à moustache reprenant l'ensemble des données et une seconde débutant à partir de 1998, c'est-à-dire en même temps que les données de deux des trois stations étudiées. Ajoutons qu'un seuil de référence a été ajouté pour pouvoir interpréter les résultats (Mouvet et al., 1986). Enfin, pour permettre la lecture de certains graphiques, les variations étant tellement importantes, une échelle logarithmique est utilisée comme on peut le voir pour le cadmium Figure 29 (les autres ETM sont en annexe 17 sauf le mercure en Figure 28).



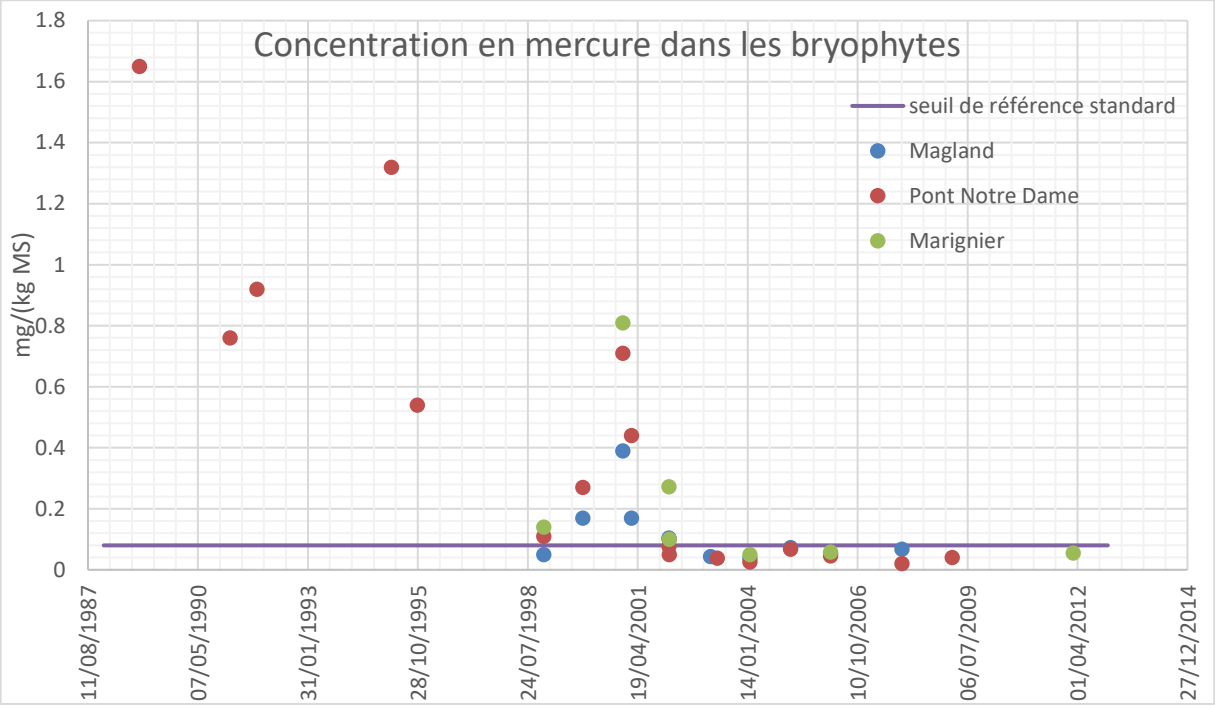
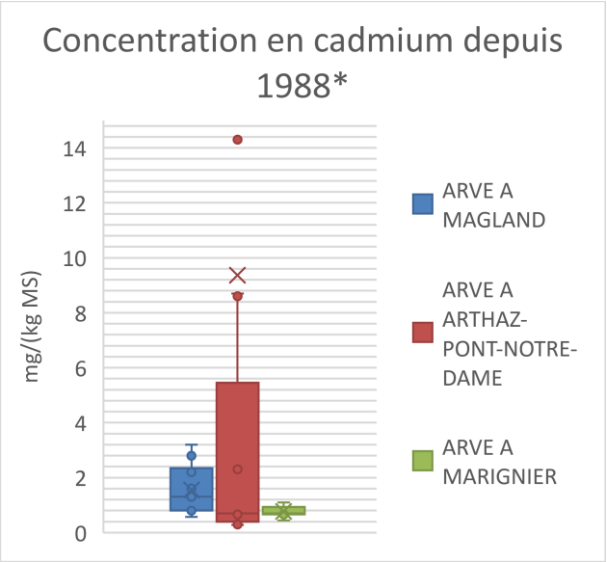
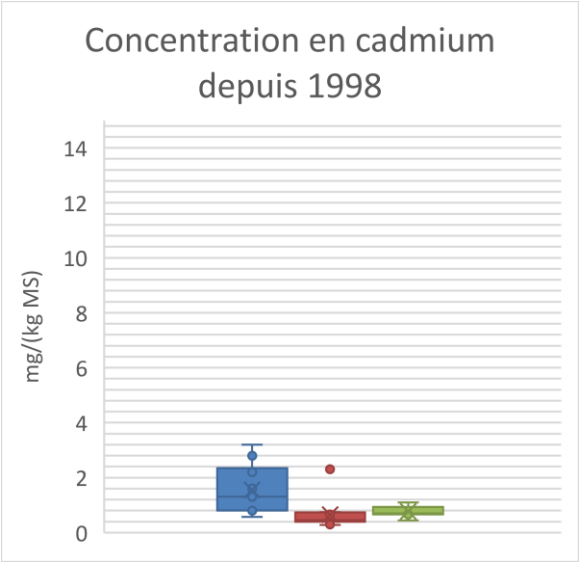
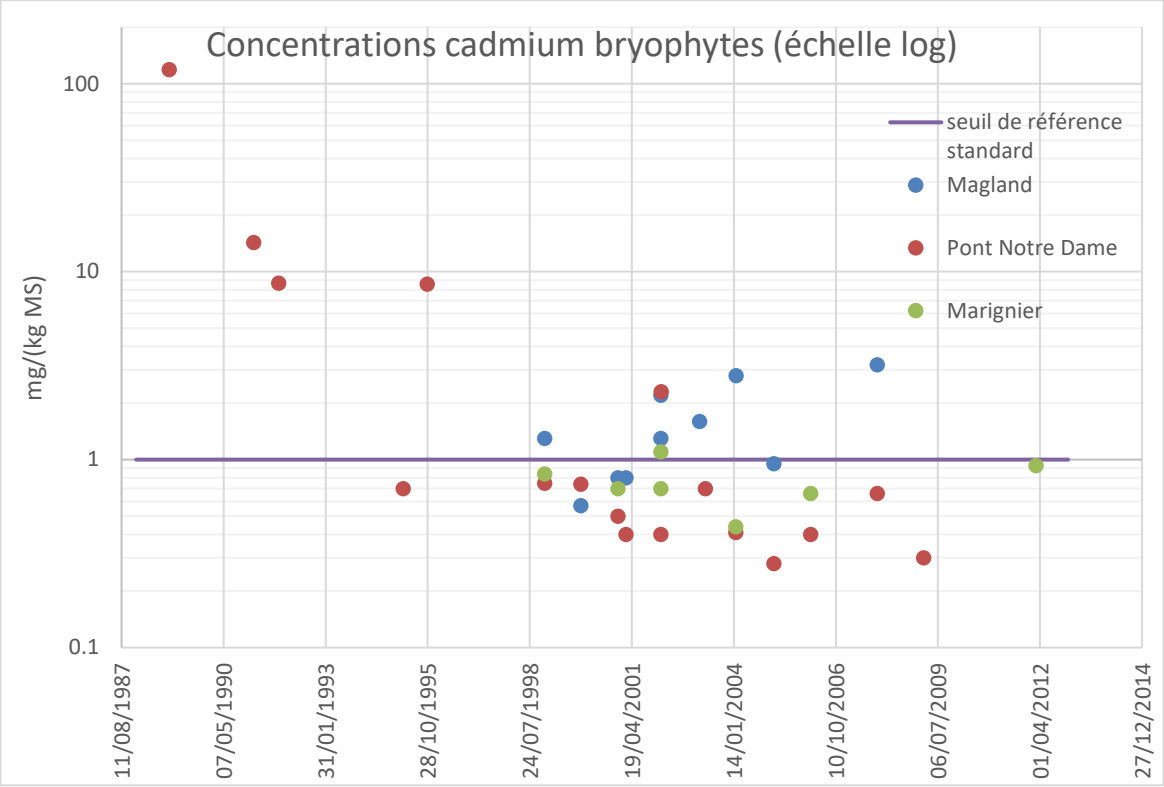


Figure 28 : Évolution dans le temps des concentrations en mercure dans les bryophytes entre les principales stations du bassin versant de l'Arve







* La valeur maximale n'est pas donnée, elle est à environ 120 mg/(kg MS)

Figure 29 : Évolution dans le temps des concentrations en cadmium dans les bryophytes, dans les principales stations du bassin versant de l'Arve

La lecture des graphiques tend à confirmer les résultats de Hype. Il semble bien y avoir une rupture dans les concentrations de polluants dans la deuxième moitié des années 90, au moins pour ce qui concerne Pont-Notre-Dame. Après cette « rupture », les tendances varient selon les stations, avec une baisse qui semble se poursuivre aux stations aval (Pont-Notre-Dame, Marignier) ou du moins se stabiliser. En ce qui concerne Magland, on retrouve visuellement la hausse calculée par Hype. Pour les autres ETM, la tendance est moins claire.

Au final, la bibliographie et l'étude des bryophytes confirme une tendance à la baisse des concentrations en ETM dans le milieu. Il s'agit d'un mouvement ancien et au moins une autre rupture dans les moyennes a pu être dégagée dans la seconde moitié des années 90 qui se confond peut-être avec la rupture relevée dans les carottes sédimentaires de Wildi et al. (2006). Le rapport amont aval, à part pour l'arsenic (substratum riche à l'amont), s'est inversé par rapport à la tendance observée pour les sédiments. Pour les bryophytes, les concentrations semblent être plus importantes à l'aval. Cette différence est difficile à expliquer, une hypothèse est que cela est dû au fonctionnement même du support considéré, c'est-à-dire un support fixe avec les bryophytes qui traduit sans doute mieux les teneurs dans l'eau. Il est possible que les sédiments ne rendent compte que partiellement de la situation réelle de leur site de prélèvement.

3.3.3 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

Comme pour les ETM, l'étude des HAP dans les sédiments est basée sur Hype, après correction des données mais, par manque de temps, le travail de normalisation n'a pas pu être fait. Le Tableau 8 présente les résultats des calculs de Hype, avec l'exclusion des résultats qui dépendait trop des limites de quantification utilisées. Par exemple, Hype a donné des résultats pour la station des Houches pour le dibenzo(a,h)anthracène mais sur les 11 valeurs sur lesquelles reposent les calculs, 10 sont à la LQ. Ces données nous informent sur le fait que les concentrations en HAP sont inférieures ou égales à la LQ mais pas sur leur réalité ni sur leur évolution dans le temps. A contrario, pour certains HAP, les LQ ne sont pas systématiquement atteintes mais Hype n'a pas trouvé de résultats.

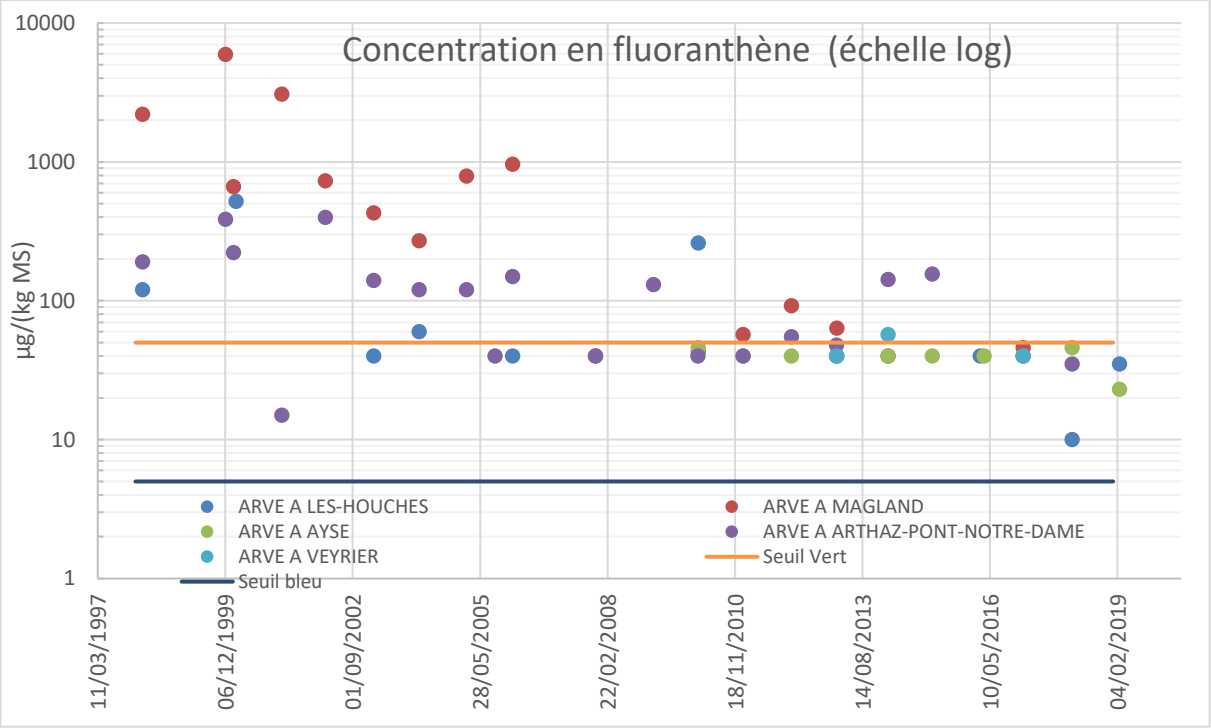
Tableau 8 : Synthèse des résultats de Hype pour l'évolution des HAP dans les sédiments, date de rupture et moyennes avant/après*

Station	ETM	Moyenne avant rupture en mg/(kg MS)	Moyenne après rupture en mg/(kg MS)	Tendance Mann-Kendall en mg/(kg MS)/an		Date de rupture
Magland	Benzo(a)anthracène	**642.22**	23.71	−1.97e+01	↘	06/02/2006
	Benzo(a)pyrène	**421.89**	17.06	−2.22e+01	↘	06/02/2006
	Anthracène	**127.1**	16.67	−5	↘	19/11/2007
	Benzo(b)fluoranthène	**942.78**	21.14	−4.13e+01	↘	06/02/2006
	Benzo(k)fluoranthène	**327.56**	16	−1.64e+01	↘	06/02/2006
	Chrysène	**1386.44**	45.86	−3.83e+01	↘	06/02/2006
	Dibenzo(a,h)anthracène	**65.56**	17.14	−2.66	↘	06/02/2006
	Fluoranthène	**1671.56**	54.51	−7.89e+01	↘	06/02/2006
	Indéno (123cd) pyrène	**230.44**	17	−9.53	↘	06/02/2006
	Naphtalène	**74.78**	25	−2.18	↘	06/02/2006
	Phénanthrène	**654.44**	52.43	−2.65e+01	↘	06/02/2006
	Pyrène	**1210.44**	43	−5.41e+01	↘	06/02/2006
Pont-Notre-Dame	Benzo(a)pyrène	**53.25**	43.47	NA		22/02/2001
	Benzo(b)fluoranthène	**150.5**	55.13	−5.06	↘	22/02/2001
	Benzo(k)fluoranthène	**44.25**	23.87	−1.43	↘	22/02/2001
	Chrysène	NA		−4.76	↘	NA
	Phénanthrène	NA		−3.65	↘	NA
	Pyrène	NA		−6.97	↘	NA

* Seuls les couples stations/HAP pour lesquels Hype a pu donner des résultats sont ici présentés.

L'étude du tableau, très incomplet par rapport à l'ensemble des données, montre que deux stations sont plus problématiques que les autres, Magland et Pont-Notre-Dame dans une

moindre mesure. Dans les deux cas les tendances sont à la baisse et même à de fortes baisses comme en témoignent les coefficients directeurs des droites de tendances. Hype détecte aussi des dates de ruptures en 2006 pour Magland et 2001 pour Pont-Notre Dame. Lorsque l'on étudie les graphiques (voir Figure 30, Figure 31 et Figure 32 ainsi que l'annexe 18), visuellement la période 2001-2003 semble correspondre à une rupture, y compris pour Magland. Pour aider à l'interprétation des résultats les seuils SEQ eau permettent de connaître l'état des cours d'eau.



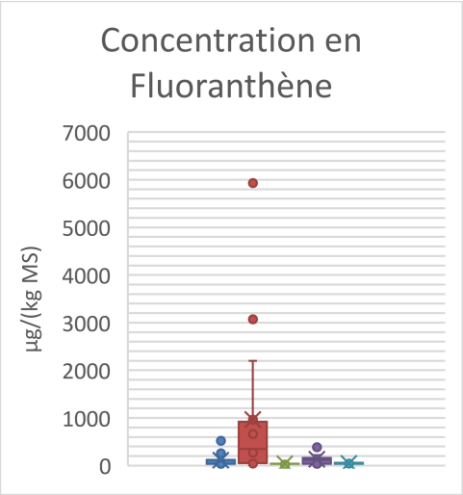
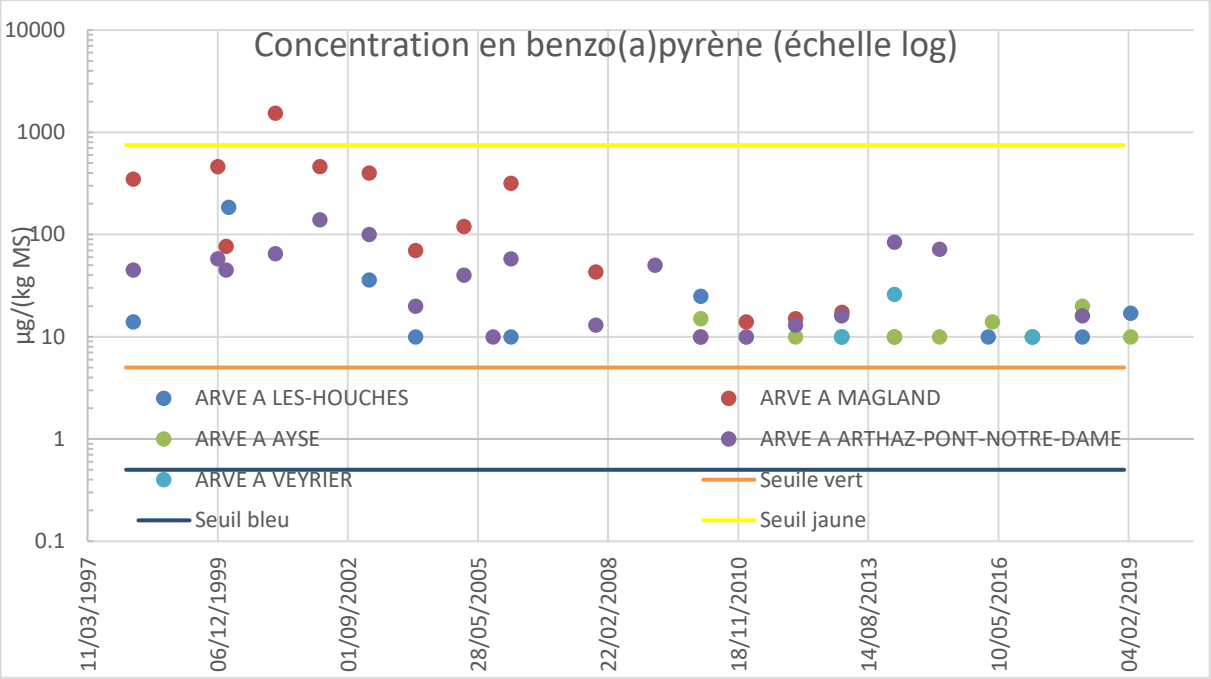


Figure 30 : Évolution dans le temps des concentrations en fluoranthène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



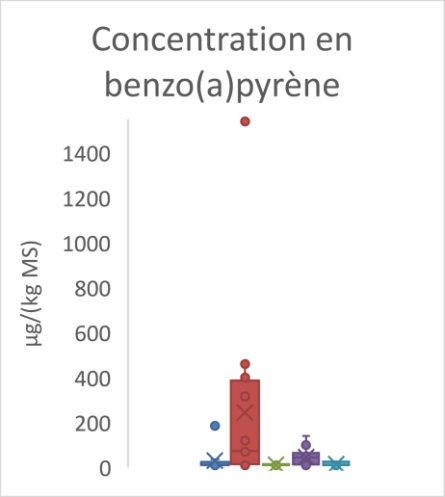
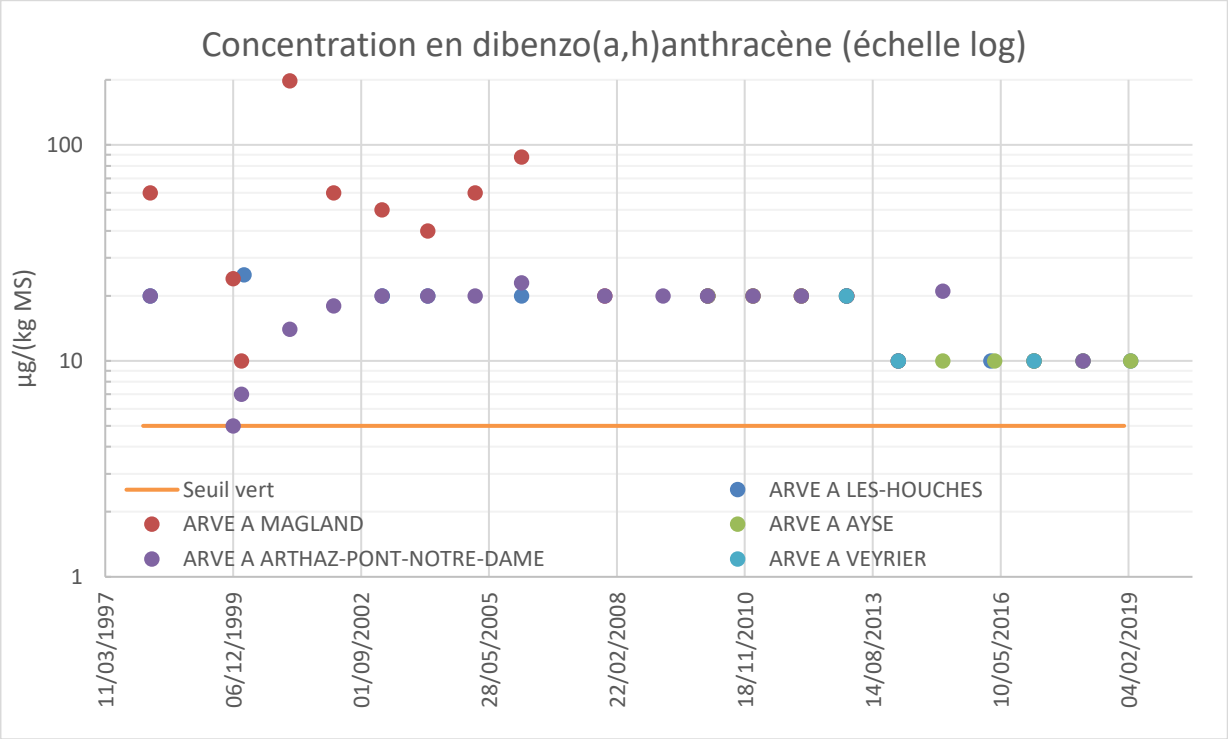


Figure 31 : Évolution dans le temps des concentrations en benzo(a)pyrène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



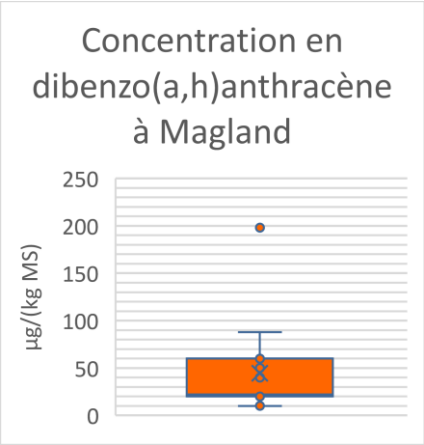


Figure 32 : Évolution dans le temps des concentrations en dibenzo(a,h)anthracène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve

Hormis pour l'acénaphtène, l'acénaphtylène et le fluorène pour lesquels les niveaux de concentration sont très largement à la LQ, les graphiques confirment les observations données par Hype. Globalement, il y a une tendance à la baisse et on observe aussi que la situation de Magland est la plus dégradée pour les 13 HAP présentés. Les stations des Houches, Ayse et Veyrier ont des états plus favorables et globalement une situation satisfaisante à l'exception du benzo(a)pyrène. Les valeurs de la station de Pont-Notre-Dame témoignent aussi d'une situation dégradée localement, beaucoup moins que pour Magland, en particulier en ce qui concerne le phénanthrène, le fluoranthène, le pyrène, le benzo(a)anthracène, le chrysène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(ghi)pérylène, le dibenzo(a,h)anthracène et l'indéno(1,2,3-cd)pyrène ainsi que le benzo(a)pyrène. Pour les deux stations problématiques, il est difficile de situer une rupture dans les tendances mais on peut voir qu'une accélération de la baisse se produit entre 2000 et 2003, y compris pour Magland à la différence des résultats de Hype. Une

observation rapide de l'évolution des concentrations dans les sédiments à Magland montre que les HAP présentés ont une évolution similaire, ce que confirme la Figure 33.

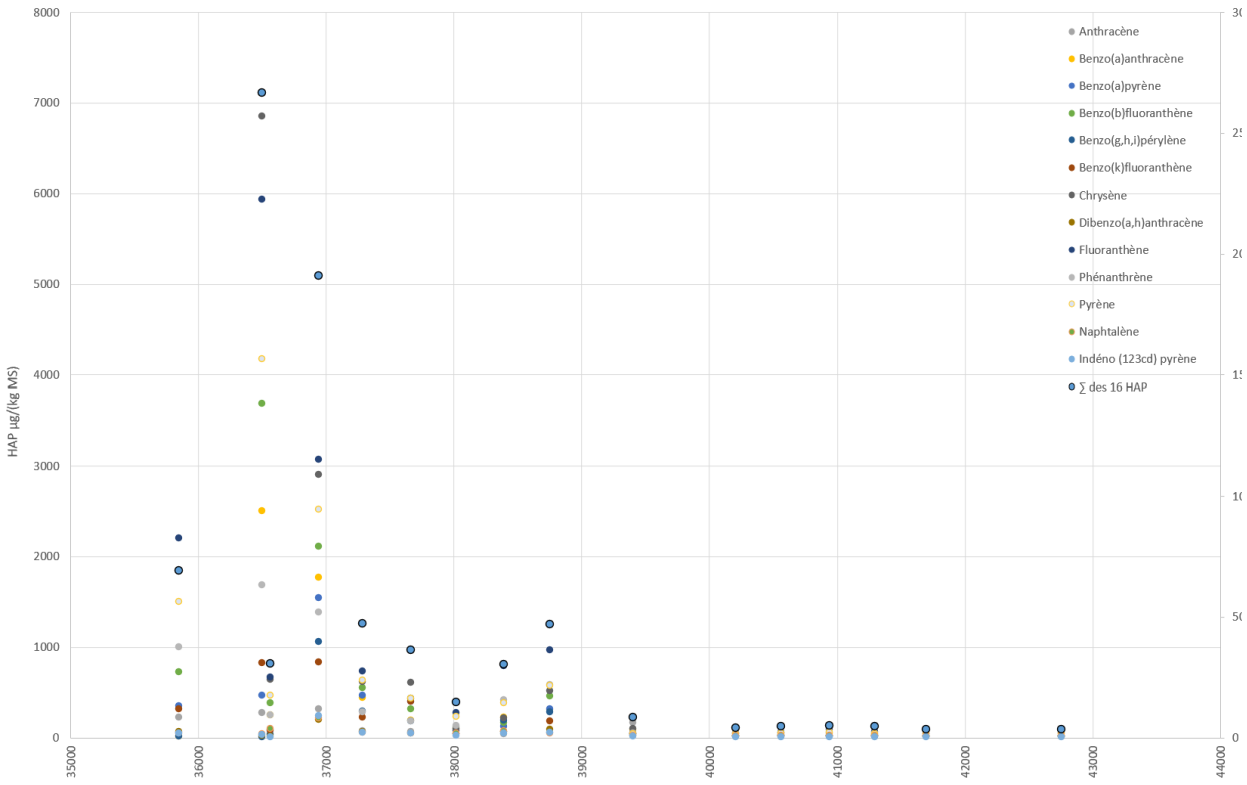


Figure 33 : Comparaison de l'évolution dans le temps des HAP dans les sédiments à Magland

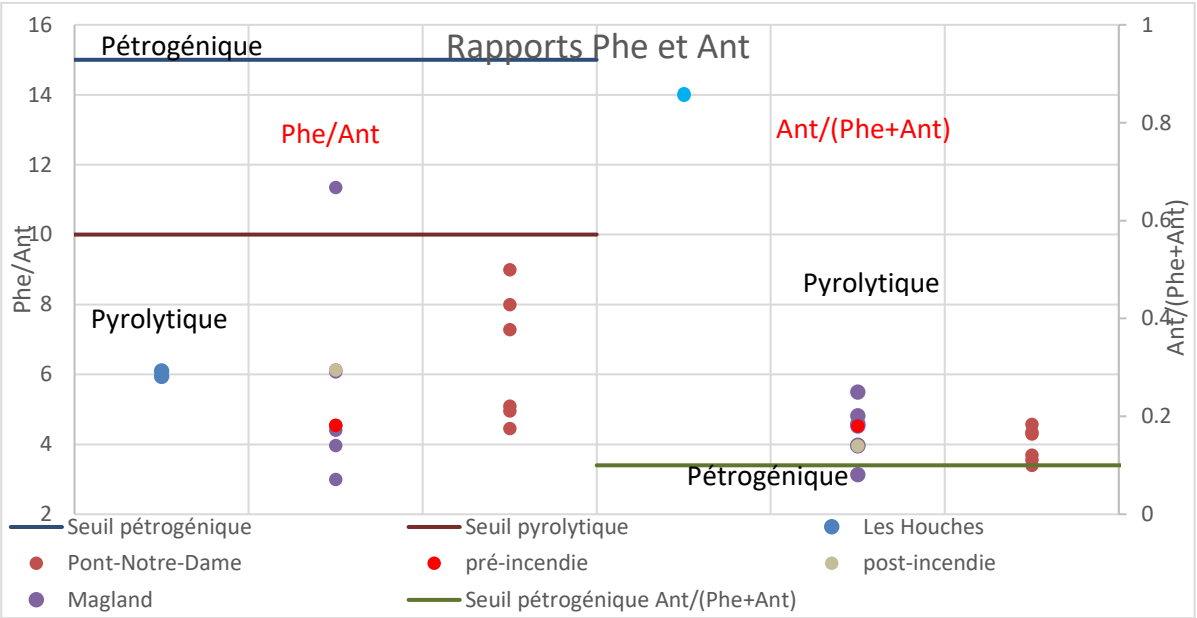
Ces similitudes dans l'évolution font penser que ces HAP ont une origine commune. On remarque également deux valeurs singulières, la première en décembre 1999 qui correspond au maximum du graphique (sauf pour l'anthracène, le benzo(a)pyrène, l'indéno(123-cd)pyrène et le dibenzo(a,h)anthracène). Ce point maximum, pour presque tous les HAP, est suivi d'un point très faible. Or, moins de trois mois séparent ces deux mesures. Il est surprenant d'observer de telles différences. Les facteurs explicatifs évidents ne paraissent pas apporter de réponses. En effet, les différences de température entre décembre et février ne justifient pas une utilisation beaucoup plus massive du chauffage[31] qui pourrait entrainer une sur-combustion du bois alors même que le mois le plus froid est janvier ce qui doit impacter les sédiments en février.

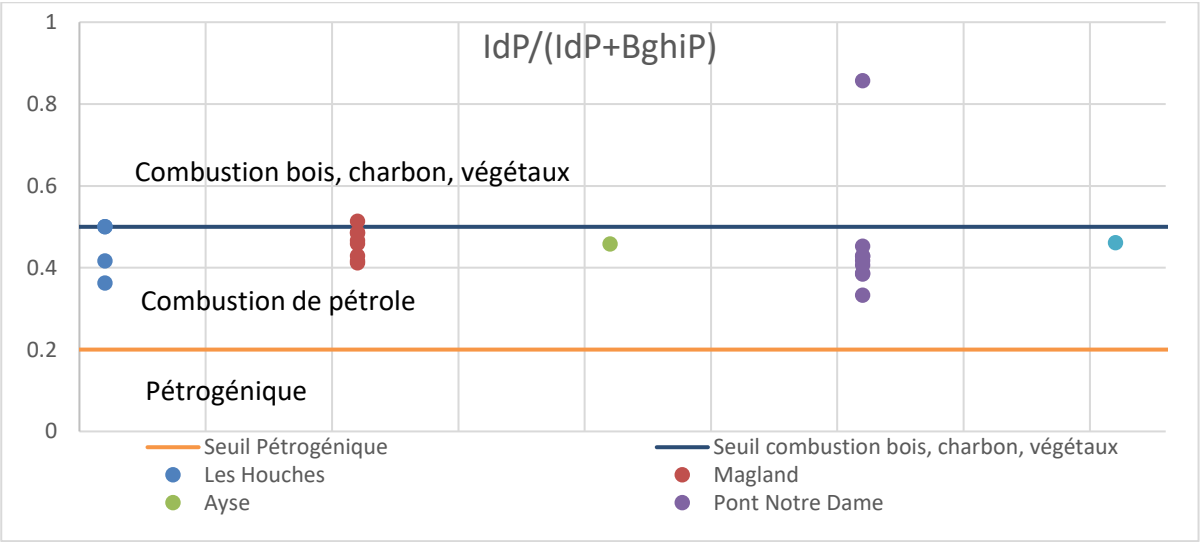
Il est donc possible qu'un évènement majeur ait provoqué le maxima de 1999. Or, l'incendie du tunnel du Mont-Blanc a eu lieu du 24 au 26 mars 1999. L'incendie peut également expliquer la

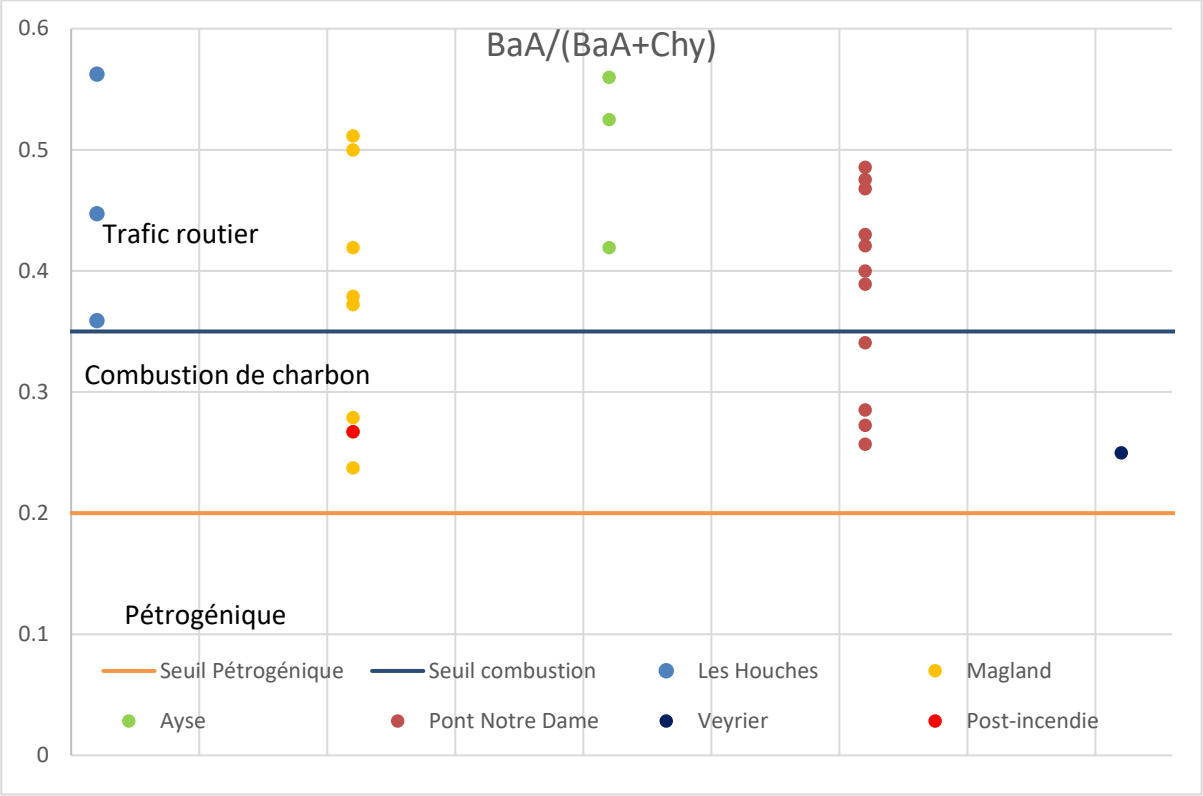
[31] A bourg Saint Maurice (73) : 12/1999 Tmin : -3.4°C, 28 jours de gelées et 02/2000 Tmin : -1.9°C, 20 jours de gelées et 01/2000 Tmin : -5.8 et 30 jours de gelées. https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/07497/fevrier/2000/bourg-st-maurice.html

baisse de février 2000 puisque la circulation automobile est une source de HAP. En effet, après l'incendie, la circulation est devenue impossible par le tunnel et 90% du trafic s'est reporté vers le tunnel du Fréjus (Haudebourg, 2000). Pour autant, cette hypothèse n'est réaliste que si une origine liée au transport est démontrée.

Il est possible de déterminer l'origine des HAP par la méthode des ratios de diagnostic qui « consiste à calculer des rapports de concentration entre un composé parent et ses formes alkylées, ou entre isomères provenant de sources distinctes. Plusieurs ratios / outils de diagnostic existent dans la littérature » (Poulier et al., 2017). Les ratios proposés sont ceux utilisés dans le rapport de l'OSR sur l'évaluation des sources de contaminants (voir annexe 13). Sont exclus du calcul des ratios les valeurs à la LQ. Ainsi, si au moins un des deux HAP utilisés pour le calcul d'un ratio a une valeur à la LQ pour une date donnée, le ratio pour cette date n'est pas calculé.







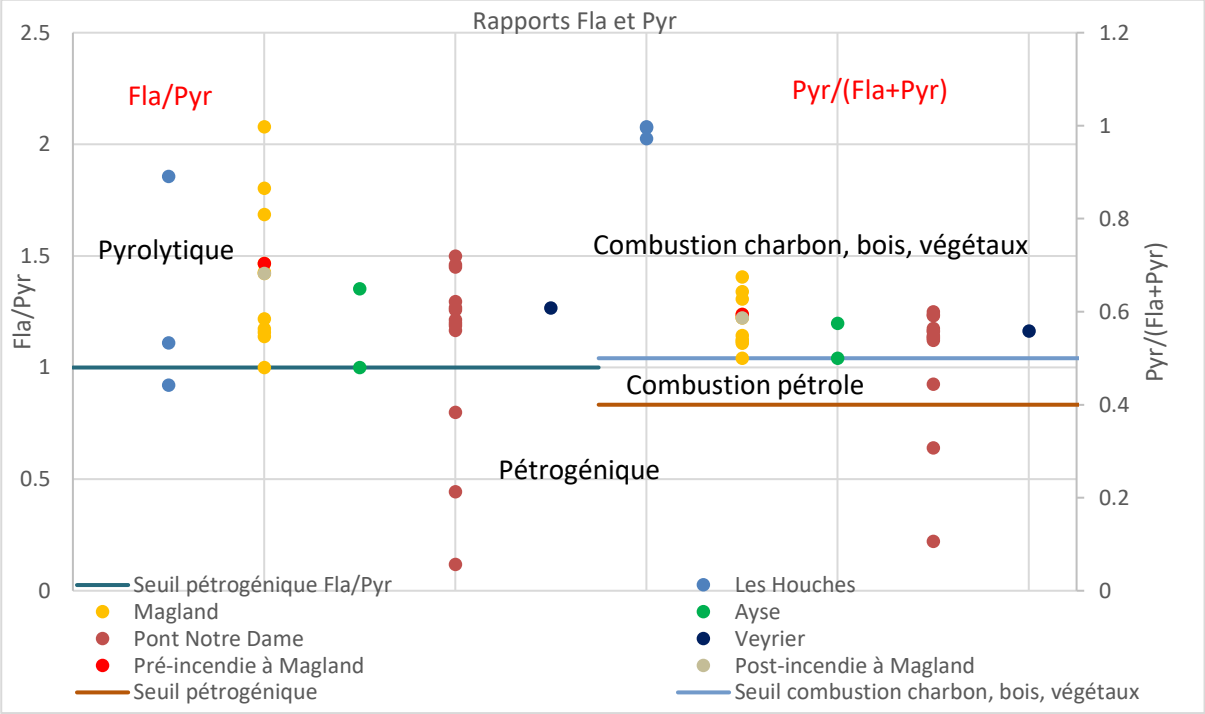


Figure 34 : Rapport entre HAP, indicateurs de l'origine des HAP pour les stations du bassin versant de l'Arve

L'analyse de ces graphiques montre que l'origine des HAP dans les sédiments est essentiellement pyrolytique. Seuls les rapports fluoranthène et pyrène nuancent ce constat à la station de Pont Notre Dame où quelques valeurs indiquent, ponctuellement, une origine majoritairement pétrogénique. Plus précisément encore, c'est bien le trafic routier et la combustion du pétrole qu'il induit qui serait la principale source de pollution aux HAP. En effet, les rapports

BaA/(BaA+Chy) et surtout IdP/(IdP+BghiP) mettent en évidence l'importance du trafic routier comme source de pollution. Le rapport Fla/(Fla+Pyr) semble indiquer le contraire avec une origine majoritairement due à la combustion de végétaux et de charbon. Ce dernier résultat est peu fiable au contraire des deux autres indicateurs considérés comme assez efficaces (Botta et al., 2014). Concernant le cas des concentrations anormalement hautes à Magland en 1999 l'analyse est à nuancer car les deux indicateurs arrivent à une conclusion différente. Pour l'indicateur IdP/(IdP+BghiP) les HAP ont une origine liée à la combustion du pétrole et à celle du charbon pour BaA/(BaA+Chy). On peut donc dire que les HAP dans la vallée de l'Arve sont surtout liés au trafic routier et qu'il est plausible, à défaut d'être certain, que la singularité de 1999 soit une conséquence du grave incendie du tunnel du Mont-Blanc.

Pour autant, il demeure deux questions, pourquoi cette concentration plus importante à Magland, alors que l'autoroute A40 qui se prolonge par la RN205 longe l'Arve et donc tous les sites de prélèvements étudiés, et qu'est-ce qui peut expliquer la baisse amorcée au début des années 2000 ? Là encore, compte tenu des délais, ce travail se limite à proposer des pistes de réflexion. Pour expliquer les niveaux de concentrations plus élevés à Magland, la piste de la topographie est intéressante. Comme expliqué dans le chapitre 1.1, le bassin versant est scindé en deux parties avec un amont aux reliefs plus marqués. Pour l'Arve cela se traduit par un cours plus encaissé, en particulier à Magland alors qu'aux Houches la vallée est ouverte vers le sud. Or, comme les HAP sont d'abord transportés par voie aérienne, il est possible que la géographie permette leur dispersion en milieu ouvert ou au contraire leur stagnation dans une vallée plus fermée.

Quant à la baisse des concentrations, si l'on retient comme principal facteur d'émission le trafic routier, l'amélioration de la situation peut se justifier par l'amélioration technique des moteurs et des échappements des véhicules mais aussi par l'amélioration des carburants. En effet, en l'an 2000 la réglementation concernant la composition de l'essence et du gazole a évolué et a limité à 1% du volume total la teneur en benzène, contre 5% auparavant (*Valeur toxicologique de référence cancérogène par inhalation pour le benzène*, 2014). Cette évolution est temporellement proche des « ruptures » observées dans les concentrations de sédiments.

Au final, comme pour les ETM, la surveillance des sédiments par le réseau nous a permis de constater la nette amélioration de la situation de la vallée pour les HAP, même si les limites de quantification ont réduit l'interprétation que l'on peut faire des résultats. Les données semblent également indiquer que la pollution est liée à l'important trafic routier dans la vallée comme point de transit vers l'Italie ou d'accès aux stations de ski.

4 CONCLUSION GENERALE

Alors que la vallée de l'Arve n'est pas spécialement connue du grand public pour des problèmes liés à l'eau la situation est à nuancer, c'est du moins ce que nous apprend son réseau de mesure. Ce dernier s'est enrichi périodiquement depuis 1971, en accompagnant les évolutions réglementaires. Chaque grand texte législatif a été suivi, sur le territoire, d'une évolution du réseau de suivi de la qualité des eaux. L'amélioration n'est pas seulement quantitative, avec un nombre de stations surveillées tous les ans en augmentation lente, c'est aussi une amélioration qualitative avec un accroissement important du nombre de paramètres et également du nombre de supports. De quelques paramètres au début des années 70 (21 paramètres suivis en février 1971) correspondant très largement aux critères de la grille d'évaluation de 1971 ("Critères d'appréciation de la qualité générale de l'eau," 1971) on a désormais plusieurs centaines de paramètres suivis rien que sur le support eau brute (798 en février 2018). À l'origine seules l'eau brute et l'eau filtrée étaient des supports d'étude auxquels se sont adjoints les bryophytes en 1988 et les sédiments en 1998.

L'étude poussée des sédiments a permis de mettre en évidence une amélioration globale de l'état des eaux du bassin versant de l'Arve, concernant les ETM et les HAP, lors des deux dernières décennies. La baisse des concentrations en polluants s'est faîte par étape que l'outil Hype nous a aidés à mettre en évidence, entre 2004 et 2006 pour la plupart des métaux et par paliers (2001 et 2006) pour les HAP.

Il est difficile de trouver une explication simple et unique aux raisons de cette amélioration, malgré tout quelques hypothèses peuvent être avancées. Pour les ETM, les raisons principales des diminutions des concentrations dans l'eau semblent être la baisse des émissions industrielles en lien avec la fermeture d'entreprises (T2R et CAUX SCIONZIER), ou la modification de pratiques de rejets couplée à l'accroissement du réseau d'assainissement. Pour ce qui concerne les HAP dans les sédiments, ils sont essentiellement générés par le trafic routier, c'est du moins les résultats des tableaux de rapports entre HAP. La baisse que l'on observe peu après l'an 2000 pourrait résulter d'évolutions réglementaires, en particulier la modification de la composition des carburants et la réduction du pourcentage de benzène admissible. De plus, les disparités entre les stations sont dues à la géographie du bassin versant, avec un substrat riche en certains minéraux à l'amont pour les ETM et une topographie à Magland plus apte à piéger les polluants aériens générés par le trafic de l'A40 pour les HAP.

Alors que la qualité des eaux de l'Arve s'améliore, la crise sanitaire de la COVID-19 pourrait avoir un impact négatif à moyen et long terme. En effet, parmi les enseignements de la crise, il s'est fait jour la nécessité de relocaliser en France certaines activités jugées stratégiques. La vallée de l'Arve par son histoire et son secteur industriel encore très dynamique pourrait bénéficier de ce renouveau de l'industrie. Or, l'industrie génère des pollutions directes, comme on l'a vu pour les ETM, et indirectes avec la circulation de poids lourds sources de pollution aux HAP. Les acteurs

du territoire devront donc se montrer particulièrement vigilants sur les niveaux d'émissions. Une première étape serait de renforcer et pérenniser le réseau de suivi existant, seul outil permettant de poser un diagnostic et de connaître l'évolution de l'état des cours d'eau. Le renforcement du réseau serait nécessairement quantitatif, avec plus de stations, mais aussi qualitatif avec des LQ inférieures aux seuils bleus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANSES, 2014. Valeur toxicologique de référence cancérogène par inhalation pour le benzène (expertise collective No. CAS 71-43-2). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.

Assainissement non collectif [WWW Document], 2015. Cluses Arve et montagne. URL https://www.2ccam.fr/fr/assainissement-dechets/assainissement-collectif-et-non-collectif/ (accessed 7.16.20).

Botta, F., Albinet, A., Ughetto, E., Leoz-Garzandia, E., 2014. Origine des HAP dans les milieux aquatiques - Bilan des méthodes d'identification des sources applicables au domaine de l'eau et premier choix des profils caractéristiques appropriés (No. RC-14-136861-01815A). INERIS & ONEMA.

Carre, E., 2018. Qualité biologique des eaux usées traitées en vue de la réutilisation. Université de Lyon, Lyon.

Cayambo, S., 2018. Synthèse et analyse des campagnes de mesures sur la contamination des sédiments du Rhône (Mémoire de TFE). ENTPE, Vaulx-en-Velin.

CE, 2013. Directive 2013/39/EU du parlement européen et du conseil du 12 Août 2013.

CE, 2008. Directive 2008/105/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 décembre 2008.

CE, 2000. 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.

Cohén, M., Briod, Ph., 1989. Les apports solides de l'Arve dans le Rhône genevois. La Houille Blanche 301–305.

Commissariat général au développement durable, 2015. L'occupation des sols en France : progression plus modérée de l'artificialisation entre 2006 et 2012. Le point sur 4.

Critères d'appréciation de la qualité générale de l'eau, 1971.

Croizet, N., Lopez, B., 2015. Hype - outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines Manuel d'utilisation.

Darmendrail, D., Baize, D., Barbier, J., Freyssinet, P., Mouvet, C., Salpéteur, I., Wavrer, P., 2000. Fonds géochimique naturel - État des connaissances à l'échelle nationale (No. BRGM/RP-50158-FR). BRGM.

Diallo, M., 2010. Méthodologie et contrôle de qualité. Université de Strasbourg.

Fauvain, H., Lepeu, A., Vermeulen, J., 2006. Gestion des matériaux solides de l'Arve: à la recherche d'un profil de référence de Chamonix à Genève. Archives des Sciences 185–192.

France, 2010. Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement - version consolidée du 28 juin 2010.

France, 1992. LOI n° 92-3 sur l'eau, environnement.

France, 1964. Loi n° 64-1245 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution.

Gudin, G., 2016. Rapport environnemental du SAGE de l'Arve, SAGE du bassin de l'Arve. SM3A, Saint-Pierre-en-Faucigny.

Haudebourg, A., 2000. Rapport sur les conséquences à court, moyen et long terme à tirer de l'incendie dans le tunnel du Mont Blanc. Conseil National des Transports (CNT).

INSEE, n.d. Populations communales de 1876 à 2017 [WWW Document]. INSEE. URL https://www.insee.fr/fr/statistiques/3698339 (accessed 6.1.20).

Journée de l'observatoire des sédiments du Rhône : Programme, Recueil des résumés, Synthèse, 2018. Observatoire des Sédiments du Rhône.

LAEPS, 2011. Contrat de rivière Arve suivi de la qualité métallique sur l'Arve - campagne 2010 - Rapport final. Laboratoire d'Analyses Environnementales des Pays de Savoie.

Le Mehaute, N., Naville, T., Lepeu, A., Cardoso, C., Champault, M., Chauffier, T., 2018. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de l'Arve : synthèse du SAGE, SAGE Arve.

Lionard, E., Dabrin, A., Coquery, M., 2015. Méthodologies d'évaluation de tendances spatiales et temporelles des teneurs en contaminants dans les sédiments - Rapport AQUAREF 2015. BRGM, IRSTEA, ONEMA.

Mas, S., 2011. Atlas des zones d'emploi 2010.

Mélo, A., Wilhelm, B., Giguet-Covex, C., Arnaud, F., 2015. Construire une chronique d'inondations : Evénements hydrologiques et histoire climatique dans le bassin de l'Arve (Alpes du nord, France) entre les XVIIIe et XXIe siècles. Revue archéologique de l'est 407–416.

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017. Lutte contre la pollution en vallée de l'Arve : "Vallée de l'Arve : territoire respirable à énergie positive."

Mourier, B., Mahler, B.J., Roux, G., Persat, H., Lefèvre, I., Peretti, A., Chapron, E., Simmoneau, A., Desmet, M., Van Metre, P.C., 2012. Spatial and temporal trends in PCBs in sediment along the lower Rhône River, France. Science of the total Environnement 189–197.

Mouvet, C., Cordebar, P., Roger, P., Morhain, E., 1986. Métaux lourds et mousses aquatiques dans le bassin Adour-Garonne. Université de Metz, Metz.

Noars, F., Bourg, C., 2013. Micropolluants dans les sédiments de la région Rhône-Alpes - Données cours d'eau et plan d'eau 2006-2011. Dreal Rhône-Alpes.

Observatoire touristique [WWW Document], n.d. Pays du Mont-Blanc - Communauté de communes. URL https://www.ccpmb.fr/economie-amenagement-de-lespace/tourisme-promotion-territoire/observatoire-touristique/#menu-6892 (accessed 7.20.20).

Office de tourisme de Samoëns - Rapport d'activité 2012 (Bilan d'activités annuel 2012 - Observatoire), n.d. Office de tourisme de Samoëns.

Poulier, G., Miège, C., Coquery, M., 2017. Evaluation des sources de contaminants organiques - Action IV.2 (No. OSR4 2015-2017). Observatoire des Sédiments du Rhône & IRSTEA, Villeurbanne.

Quest, C., n.d. Fichier géographique de localisation des installations classées.

Salminen, R., Batista, M.J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O'Connor, P.J., Olsson, S.Å., Ottesen, R.-T., Petersell, V., Plant, J.A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A., Tarvainen, T., 2005. FOREGS Geochemichal Atlas of Europe Part 1 - Background Information, Methodology and Maps, Geological Survey if Finland. ed. Esboo (Finlande).

SM3A, 2018. SAGE Arve : Plan d'Aménagement et de Gestion Durable.

Sonney, R., Blum, A., Chery, L., 2005. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin du Rhône-Méditerranée-Corse - Rapport de Phase 1 recueil des données et des informations (No. BRGM/RP-54031-FR). BRGM.

Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau - grilles d'évaluation SEQ-EAU (version 2), 2003. MEDD & Agences de l'eau.

Vah, M., 2019. Transport sédimentaire induit par un courant : effet du disponible sédimentaire. Normandie Université, Le Havre.

Wildi, W., Koukal, B., Ischi, V., Perroud, A., 2006. Qualité des sédiments de la retenue de Verbois ; comparaison avec les sédiments des rivières suisses et du Léman. Archives des Sciences 59, 131–140.

Wildi, W., Loizeau, J.-L., Dominik, J., Linn Thomas, R., 2004. River, reservoir and lake sediment contamination by heavy metals downstream from urban areas of Switzerland. Lakes & Reservoirs Research & Management 75–87.

Yari, A., Dabrin, A., Coquery, M., 2019. Méthodologie d'évaluation des tendances temporelles de contamination dans les sédiments et les matières en suspension des systèmes aquatiques continentaux. Techniques sciences méthodes 71–84.

Annexes

1. Carte de l'occupation des sols à proximité de l'Arve

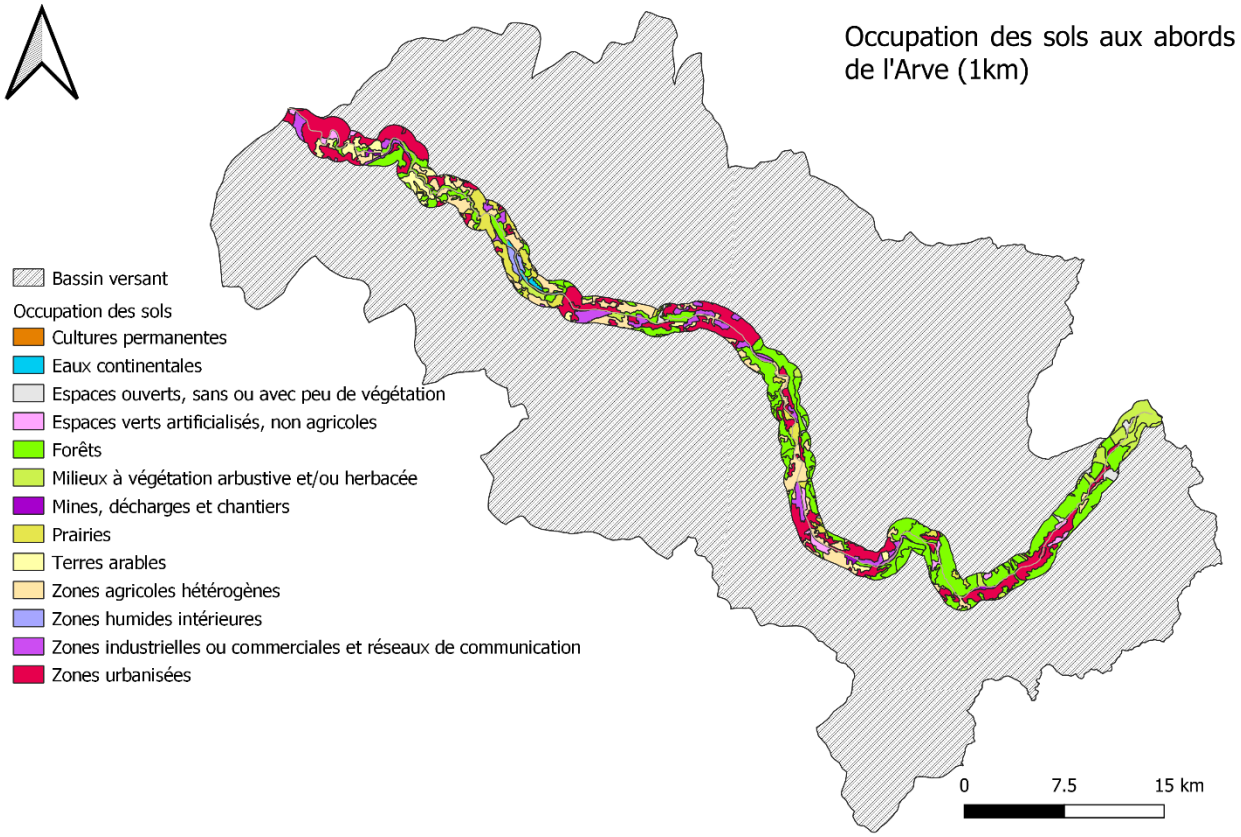


Figure 35 : Occupation des sols aux abords de l'Arve (source Corine Land Cover)

2. Cartographie des STEPs du bassin versant de l'Arve

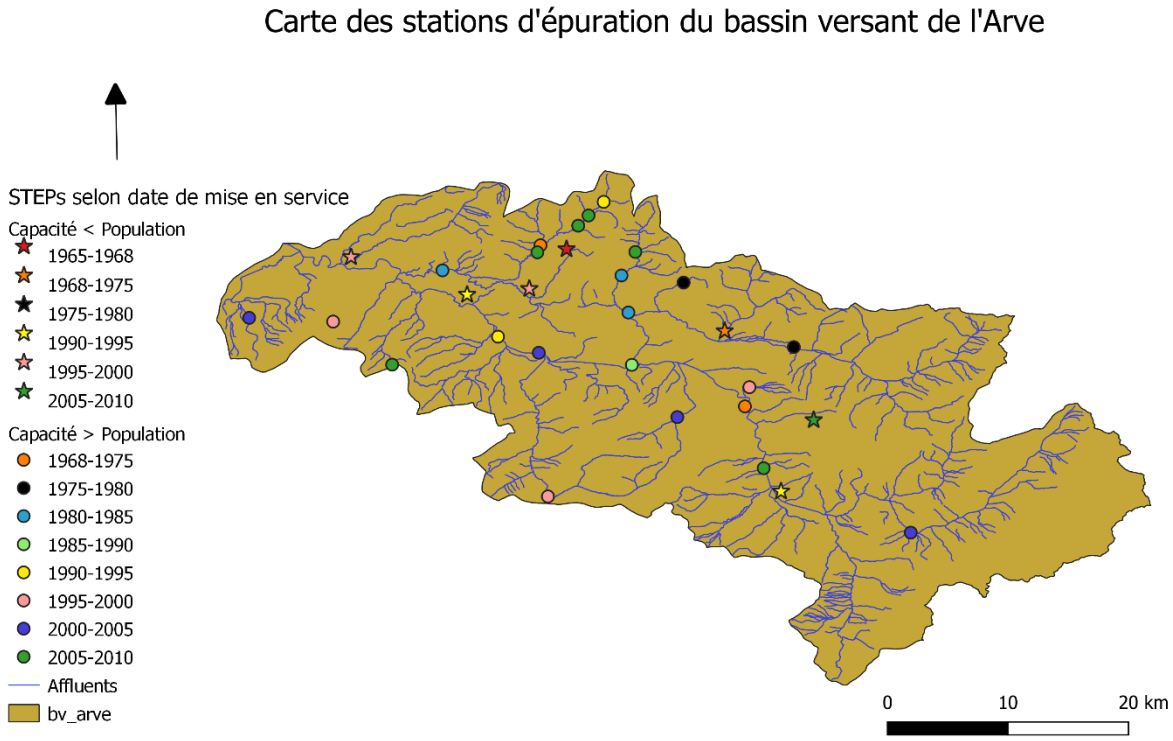
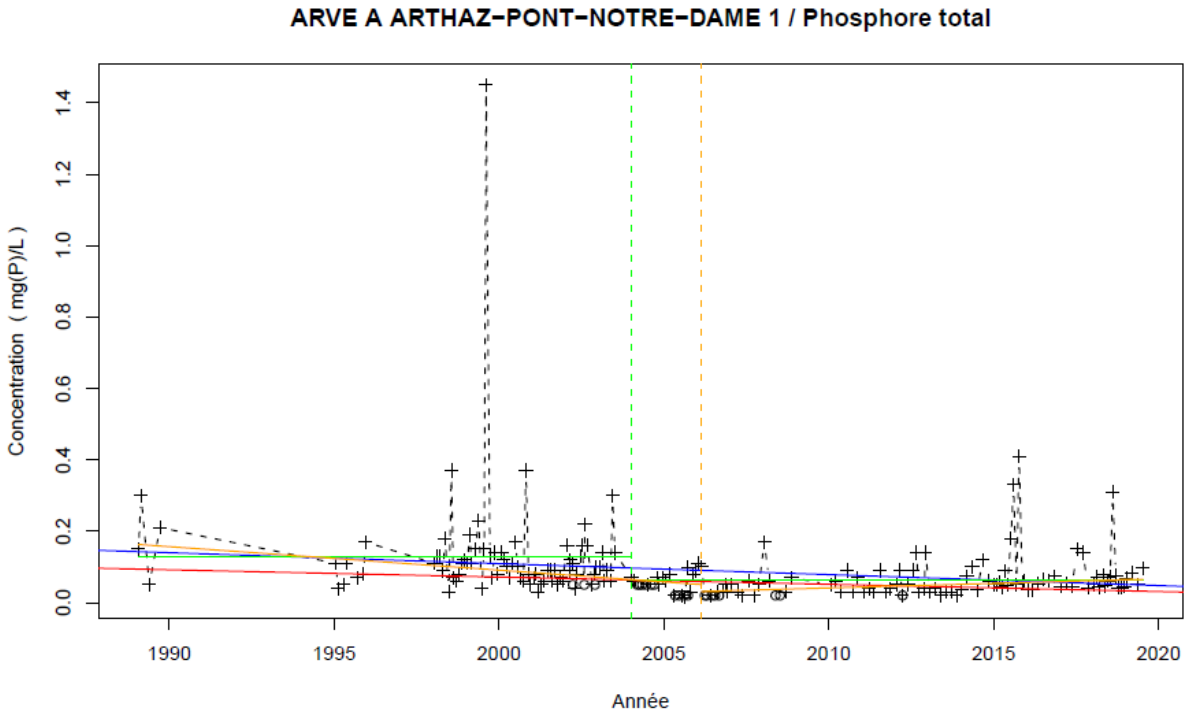


Figure 36 : Carte des STEPs du bassin versant de l'Arve (source : data.gouv.fr)

3. Évolution de la DBO5 et de la concentration en phosphore à la station de Pont Notre Dame sur l'Arve



Légende

- Série temporelle
- Valeur > LQ
- Valeur <LQ, <LD, traces...
- Tendance (Mann-Kendall)
- Tendance (régression linéaire)
- Date de changement de moyenne
- Moyenne avant/après rupture
- Date d'inversion de tendance
- Tendance avant/après rupture

Nombre de données : 206
Longueur de la chronique : 11122 jours (30.5 années)
Taux de quantification : 89.8 %

Données non autocorrélées

Données non normalement distribuées
(pval-Shapiro= 2.1e-25)

Tendances identifiées sur la longueur totale de la chronique

Test	Pente	P-value
Mann-Kendall	-2.03e-03 mg(P)/L /an	1e-06
Mann-Kendall modifié	Non effectué (données non autocorrélées)	
Régression linéaire	-3.07e-03 mg(P)/L /an	6.4e-03

Ruptures identifiées

Test	Date	P-value
Changement de moyenne (Pettitt)	05/01/2004	2e-11
Inversion de tendance	22/02/2006	4.5e-11

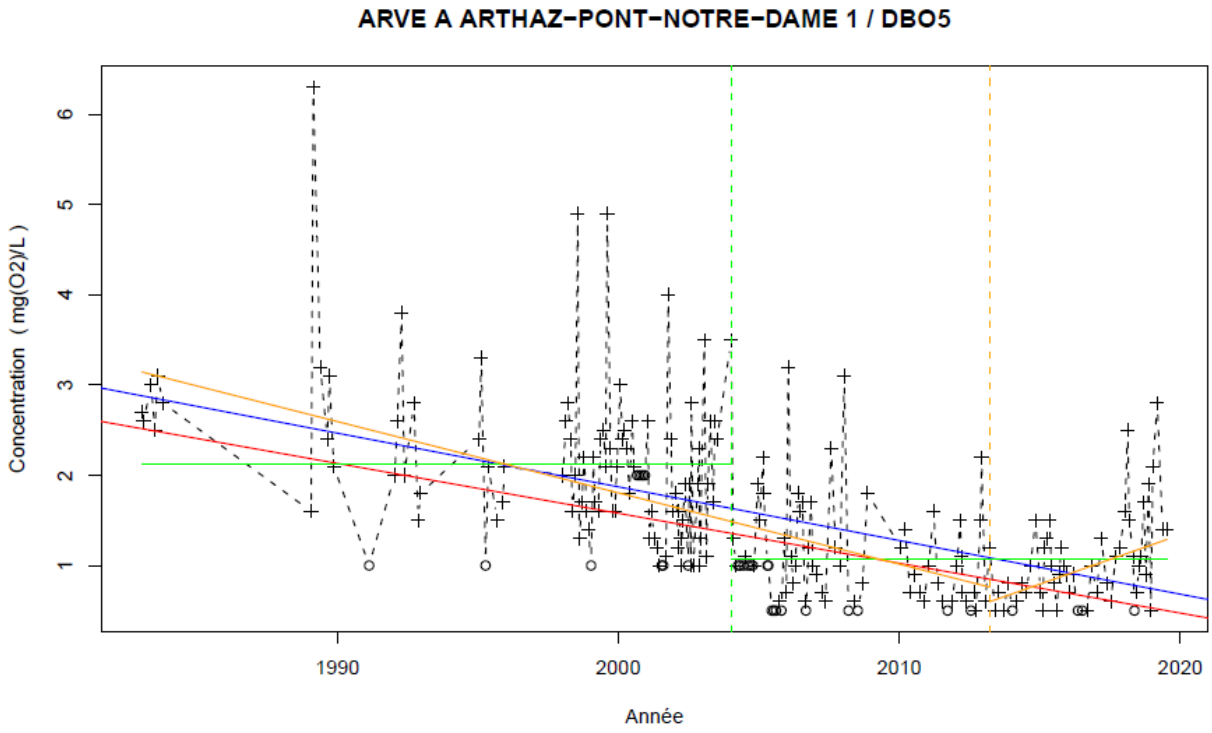
Moyenne des données avant/après rupture

	Moyenne
Avant rupture	0.13 mg(P)/L
Après rupture	0.06 mg(P)/L

Tendance avant/après inversion

Test	Pente	P-value
Mann-Kendall avant inversion	-6.58e-03 mg(P)/L /an	1e-05
Mann-Kendall après inversion	2.54e-03 mg(P)/L /an	4.6e-06

Figure 37 : Arve à Arthaz Pont-Notre-Dame / Phosphore total



Légende

- Série temporelle
- Valeur > LQ
- Valeur <LQ, <LD, traces...
- Tendance (Mann-Kendall)
- Tendance (régression linéaire)
- Date de changement de moyenne
- Moyenne avant/après rupture
- Date d'inversion de tendance
- Tendance avant/après rupture

Nombre de données : 221
Longueur de la chronique : 13320 jours (36.5 années)
Taux de quantification : 85.5 %

Données autocorrélées
(pval<0.05)
Données non normalement distribuées
(pval-Shapiro= 5.1e-12)

Tendances identifiées sur la longueur totale de la chronique

Test	Pente	P-value
Mann-Kendall	-5.53e-02 mg(O2)/L /an	1.7e-20
Mann-Kendall modifié		3.1e-09
Régression linéaire	-5.95e-02 mg(O2)/L /an	1.1e-19

Ruptures identifiées

Test	Date	P-value
Changement de moyenne (Pettitt)	05/01/2004	2.9e-20
Inversion de tendance	19/03/2013	9.4e-13

Moyenne des données avant/après rupture

	Moyenne
Avant rupture	2.12 mg(O2)/L
Après rupture	1.07 mg(O2)/L

Tendance avant/après inversion

Test	Pente	P-value
Mann-Kendall avant inversion	-7.9e-02 mg(O2)/L /an	6.9e-19
Mann-Kendall après inversion	1.09e-01 mg(O2)/L /an	1.8e-03

Figure 38 : Arve à Arthaz Pont-Notre-Dame / DBO5

4. Exemple suivi des PCB

Tableau 9 : Résultats du suivi du PCB 101 à la station de Magland dans les sédiments

DatePrel	LbLongParamètre	RsAna	CdUniteMesure	SymUniteMesure	CdRqAna
24/01/2013	PCB 101	1	132	µg/(kg MS)	10
03/03/2014	PCB 101	1	132	µg/(kg MS)	10
26/01/2017	PCB 101	1	132	µg/(kg MS)	10
12/02/2003	PCB 101	10	132	µg/(kg MS)	10
29/01/2002	PCB 101	6	132	µg/(kg MS)	1
25/02/1998	PCB 101	5	132	µg/(kg MS)	10
07/12/1999	PCB 101	5	132	µg/(kg MS)	10
08/02/2000	PCB 101	5	132	µg/(kg MS)	10
21/02/2001	PCB 101	5	132	µg/(kg MS)	10
05/02/2004	PCB 101	10	132	µg/(kg MS)	10
09/02/2005	PCB 101	10	132	µg/(kg MS)	10
06/02/2006	PCB 101	10	132	µg/(kg MS)	10
19/11/2007	PCB 101	10	132	µg/(kg MS)	10
03/02/2010	PCB 101	1	132	µg/(kg MS)	7
20/01/2011	PCB 101	1	132	µg/(kg MS)	1
02/02/2012	PCB 101	1	132	µg/(kg MS)	10

Erreur ! Liaison incorrecte.10 = Résultat < au seuil de quantification

7 = Résultat < au seuil de quantification et > au seuil de détections ➔ traces

1 = Résultat > au seuil de quantification et < au seuil de saturation ou Résultat = 0

5. Concentration en cadmium dans les sols

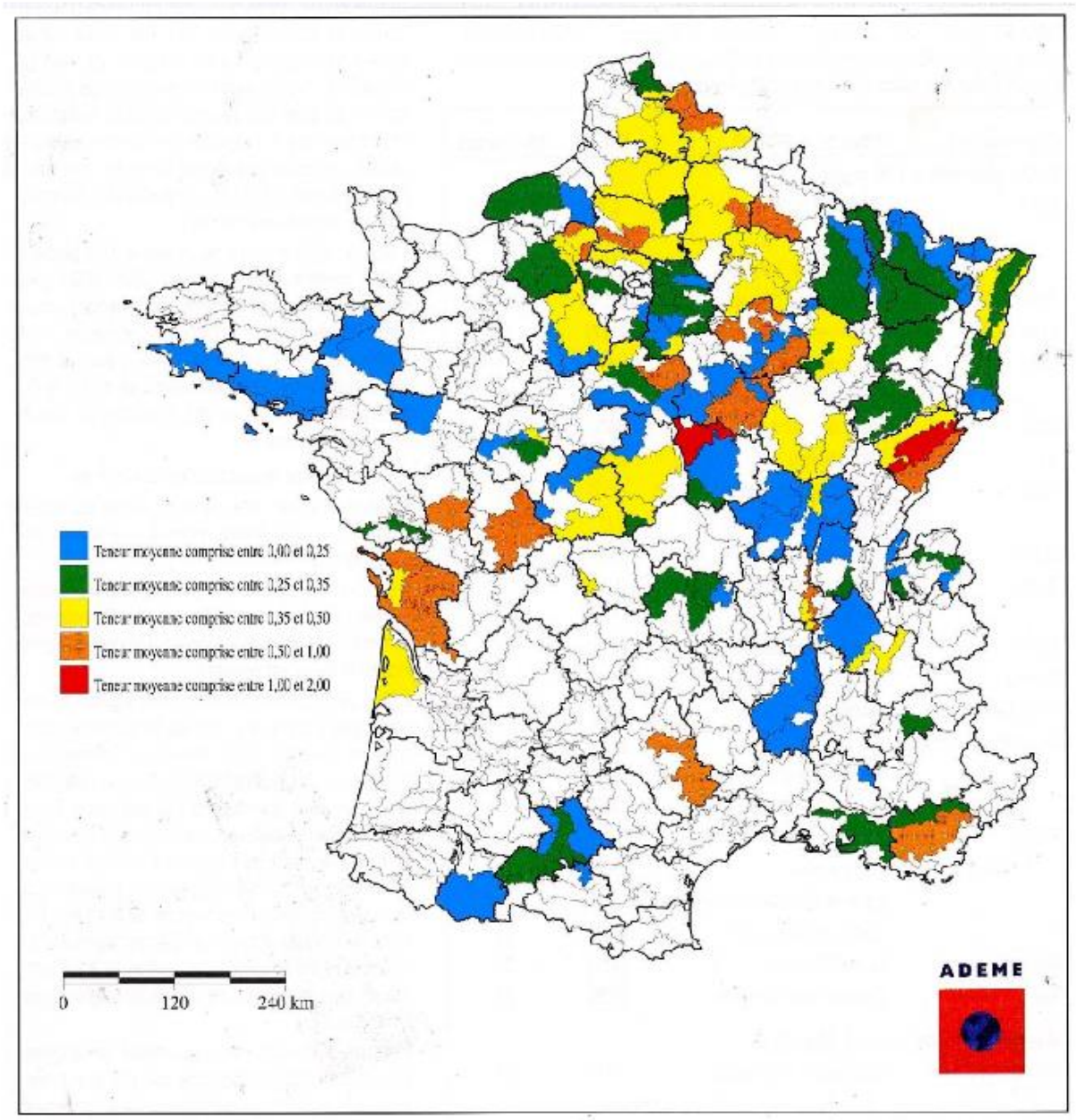
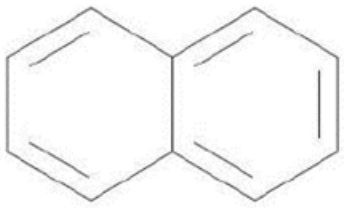


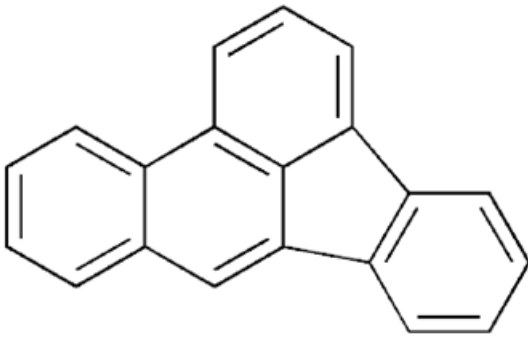
Figure 39 : Carte des valeurs moyennes en Cd par petites régions agricoles programme ADEME/INRA[32]

[32] Darmendrail, D., D. Baize, J. Barbier, P. Freyssinet, C. Mouvet, I. Salpéteur, et P. Wavrer. « Fonds géochimique naturel - État des connaissances à l'échelle nationale ». BRGM, juin 2000. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50158-FR.pdf.

6. Structure des HAP : naphtalène et benzo(b)fluoranthène



Structure naphtalène



Structure benzo(b)fluoranthène

Figure 40 : Structure des HAP, exemple du naphtalène et du benzo(b)fluoranthène

7. Nombre stations selon le nombre de jours de prélèvements

Tableau 10 : Nombre de stations selon le nombre de jours de prélèvements

Nombre de jours de prélèvements	Nombre de stations selon le nombre de jours de prélèvements	Pourcentage du nombre de stations selon nombre de jours de prélèvement	Nombre de jours de prélèvements	Nombre de stations selon le nombre de jours de prélèvements	Pourcentage du nombre de stations selon nombre de jours de prélèvement
1	36	19,1%	9	4	2,1%
2	29	15,4%	10	3	1,6%
3	14	7,4%	11 à 15	15	8%
4	40	21,3%	16 à 60	17	9%
5	7	3,7%	61 à 100	6	3,2%
6	6	3,2%	100 à 200	5	2,6%
7	2	1%	200 à 250	1	0,5%
8	2	1 %	267 (max)	1	0,5%

8. Maxima des concentrations par station en PCB en région Rhône-Alpes, somme de 7 congénères (2006-2011)

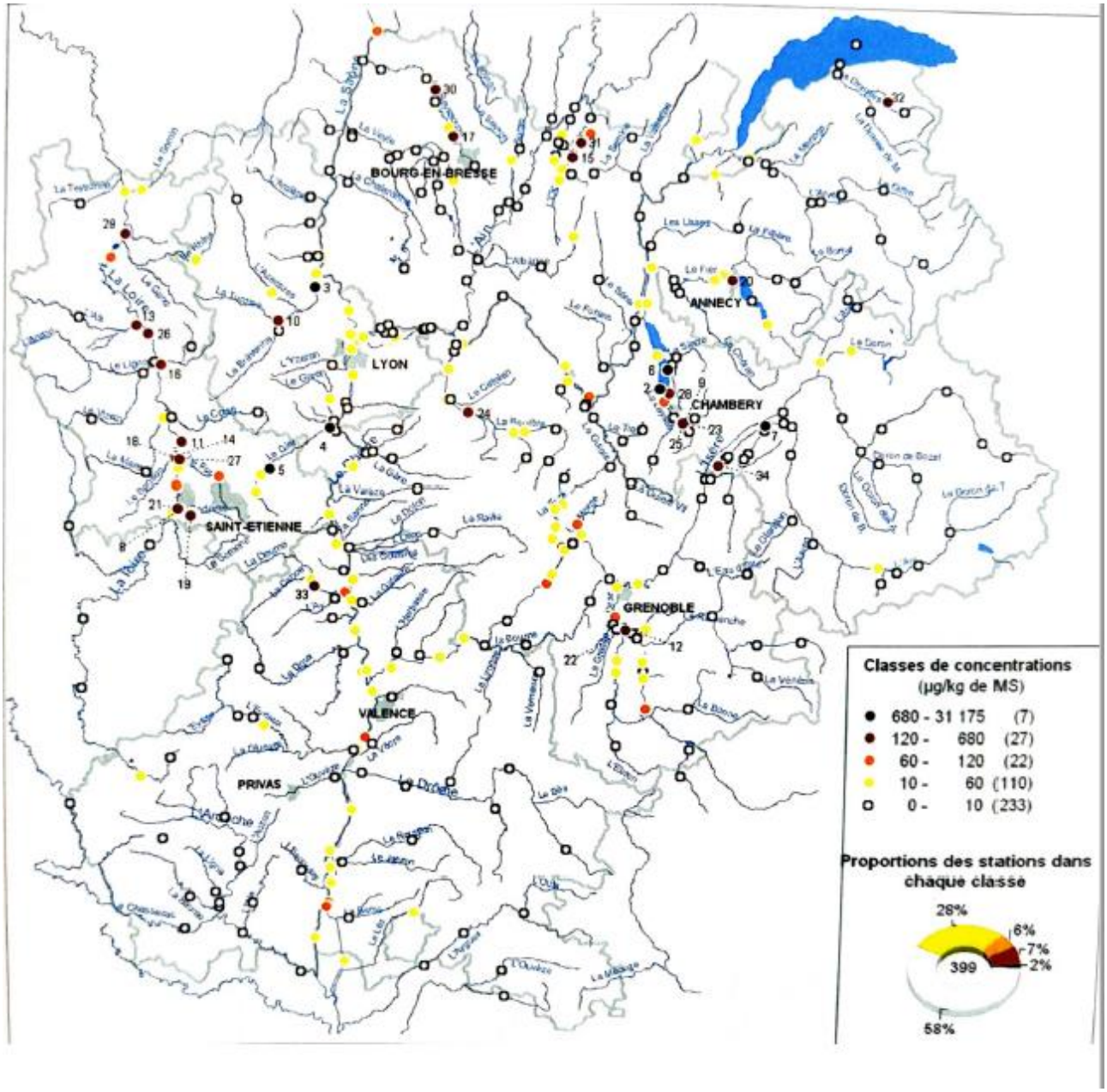
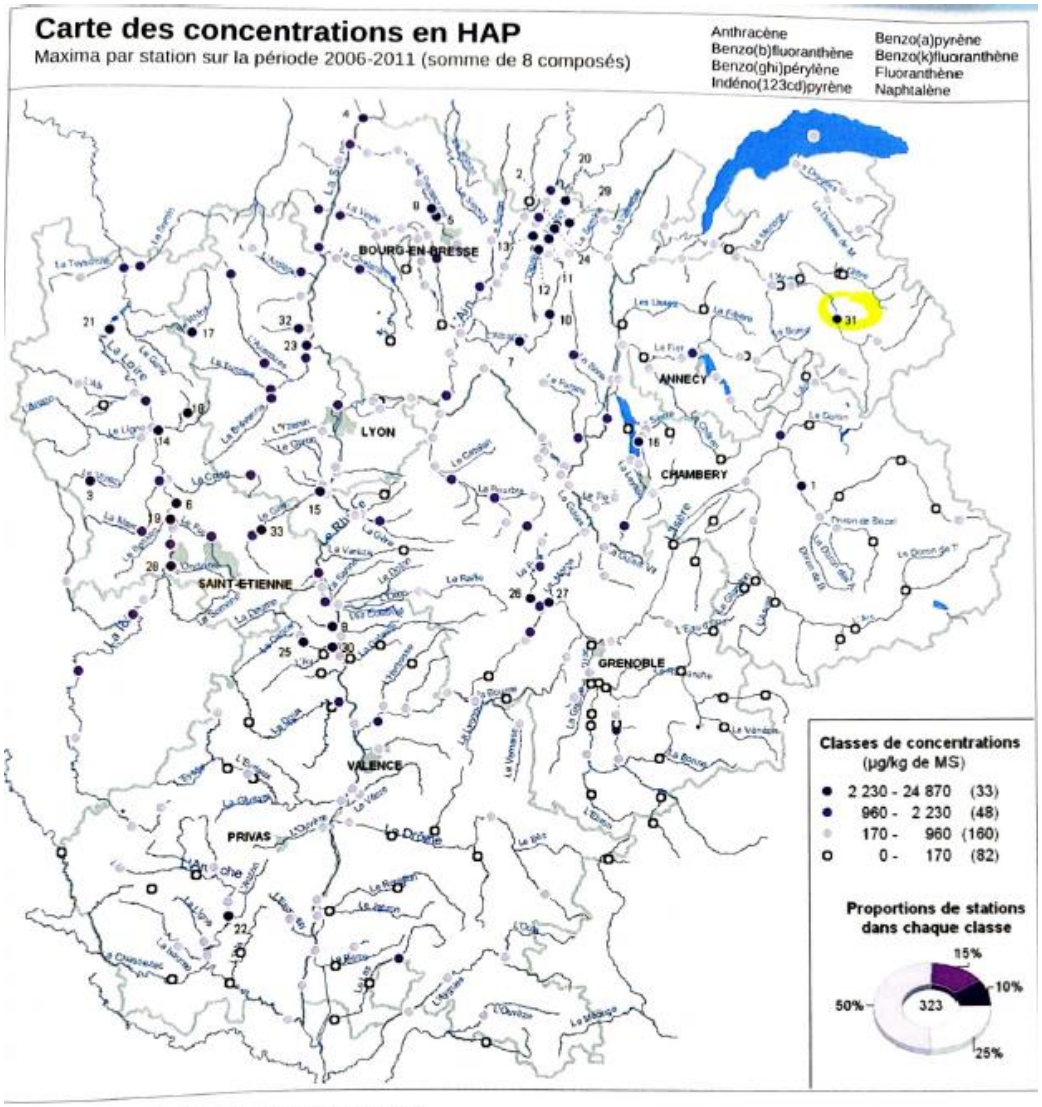


Figure 41 : Carte des concentrations en PCB indicateurs - Maxima par station sur la période 2006-2011 (somme de 77 congénères) (Noars and Bourg, 2013)

9. Carte des concentrations en HAP, maxima par station en somme de 8 composés (2006-2011)



Stations présentant les plus fortes concentrations (en µg/kg de MS)

n°	Code	Site	C
1	06134500	Isère à Feissons-sur-Isère	24862
2	06580494	Ange à Belignat	16399
3	04010780	Vizezy à Essertines-en-Chatelneuf	11407
4	06045000	Seille à La Truchère	8362
5	06046000	Reyssouze à Viriat	7720
6	04009000	Loire à Veauchette	6076
7	06090600	Albarine à Argis	5667
8	06830550	Ecouflay à Saint-Désirat	5505
9	06580602	Reyssouze à Attignat	4946
10	06091665	Albarine à Corcelles	4892
11	06830001	Ange à Martignat	4823
12	06086100	Ange à Brion	4693
13	06580180	Oignin à Izernore	4470
14	04010000	Loire à Feurs	4339
15	06097000	Gier à Givors	4041
16	06074500	Tillet à Aix-les-Bains	3940
17	04013975	Rhins à Amplepuis	3906
18	04010130	Charpassonne à Panissières	3834
19	04008000	Furan à Andrézieux-Bouthéon	3793
20	06085720	Merdanson à Dortan	3530
21	04013000	Loire à Viverest	3324
22	06114450	Ardèche à Vogue	3262
23	06053800	Saône à Saint-Bernard	3240
24	06830000	Ange à Belignat	3239
25	06103000	Cance à Annonay	2891
26	06830055	Fure à Tullins - Hurtières	2870
27	06580859	Morge à Moirans	2861
28	04004900	Ondaine à Unieux	2718
29	06580172	Ange à Oyonnax	2690
30	06103500	Cance à Sarras	2582
31	06061000	Arve à Magland	2451
32	06052930	Morgon à Gleizé	2281
33	06095200	Gier à La Grand Croix	2265

Figure 42 : Carte des concentrations en HAP - Maxima par station sur la période 2006-2011 (somme de 8 composés) (Noars and Bourg, 2013)

10. Liste HAP étudiés

Tableau 11 : Abréviations des composés HAP et leurs principales propriétés*

Nom	Abréviations	Solubilité dans l'eau (en mg/L à 25°C)	Log(Kow) (valeur INERIS si donnée)	Nbre de cycles	Formule
Naphtalène	Nap	31,8	3,7	2	C10H8
Acénaphtène	Ace	3,7	3,92	3	C12H10
Acénaphtylène	Acy	16,1[33]	3,94	3	C12H8[34]
Fluorène	Fle	1,98	4,18	3	C13H10
Phénanthrène	Phe	1,2	4,57	3	C14H10
Anthracène	Ant	1,29	4,45	3	C14H10
Fluoranthène	Fla	0,26	5,13-5,33	4	C16H10
Pyrène	Pyr	0,13	5,23	4	C16H10
Benzo(a)anthracène	BaA	0,01	5,66	4	C18H12
Chrysène	Chy	0,002	5,7-6,64	4	C18H12
Benzo(a)pyrène	BaP	0,0038	6,07	5	C20H12
Benzo(b)fluoranthène	BbF	0,0015[35]	6,04-6,57	5	C20H12
Benzo(k)fluoranthène	BkF	0,00076	6,11-6,84	5	C20H12
Dibenzo(a,h)anthracèn	DbA	0,0005	6,7	5	C22H14
Benzo(g,h,i)pérylène	BghiP	0,00026	6,5	6	C22H12
Indéno(123cd)pyrène	IP	5.10-5	6,6	6	C22H12

*Les valeurs sont issues du site de l'INERIS (https://substances.ineris.fr/fr/, consulté le 23/07/2020) quant aux abréviations ce sont celles de (Poulier et al., n.d.).

[33] Valeur issue de (Botta et al., 2014)

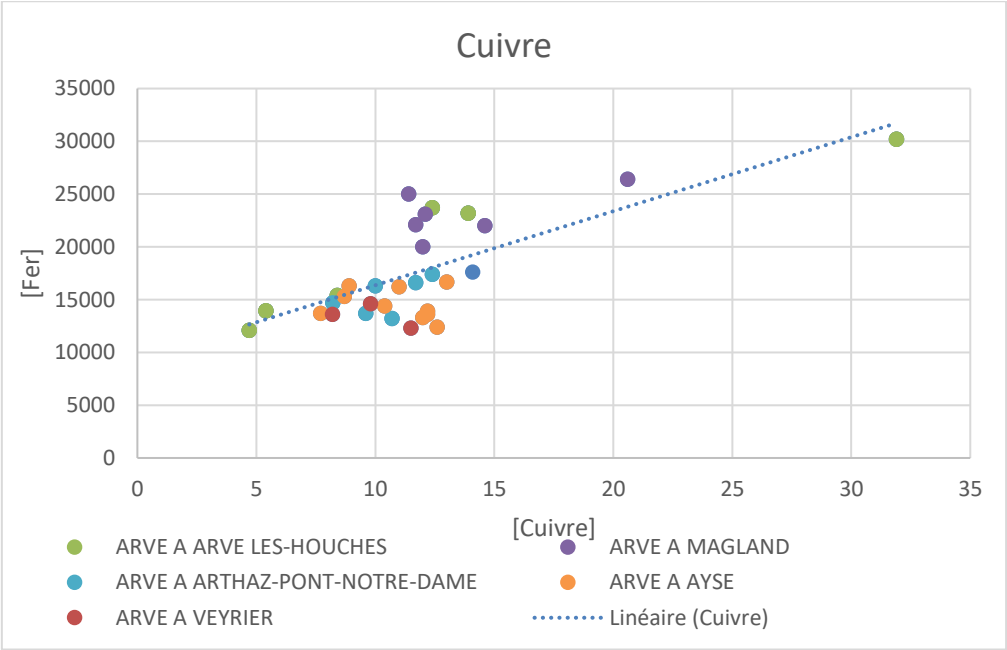
[34] Valeur issue de (Botta et al., 2014)

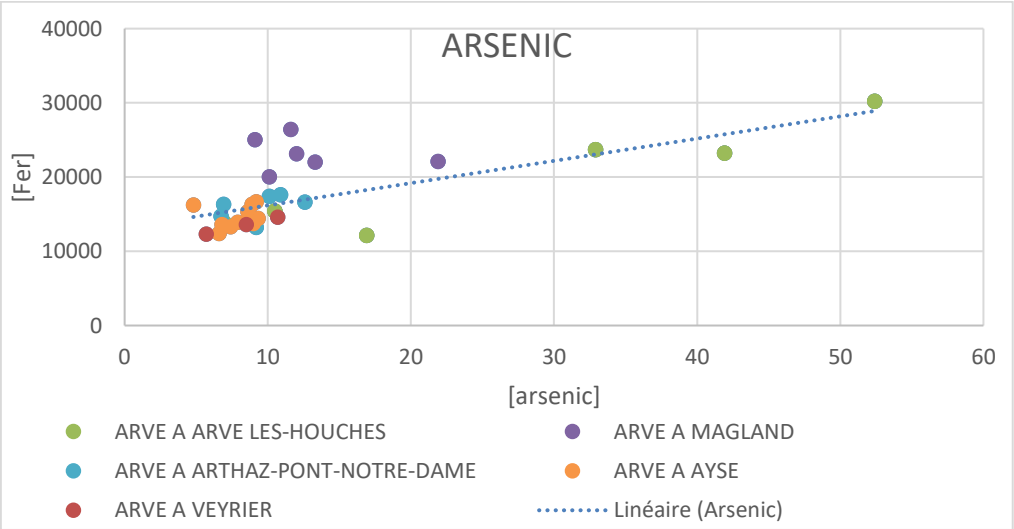
[35] Valeur issue de https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=41335.

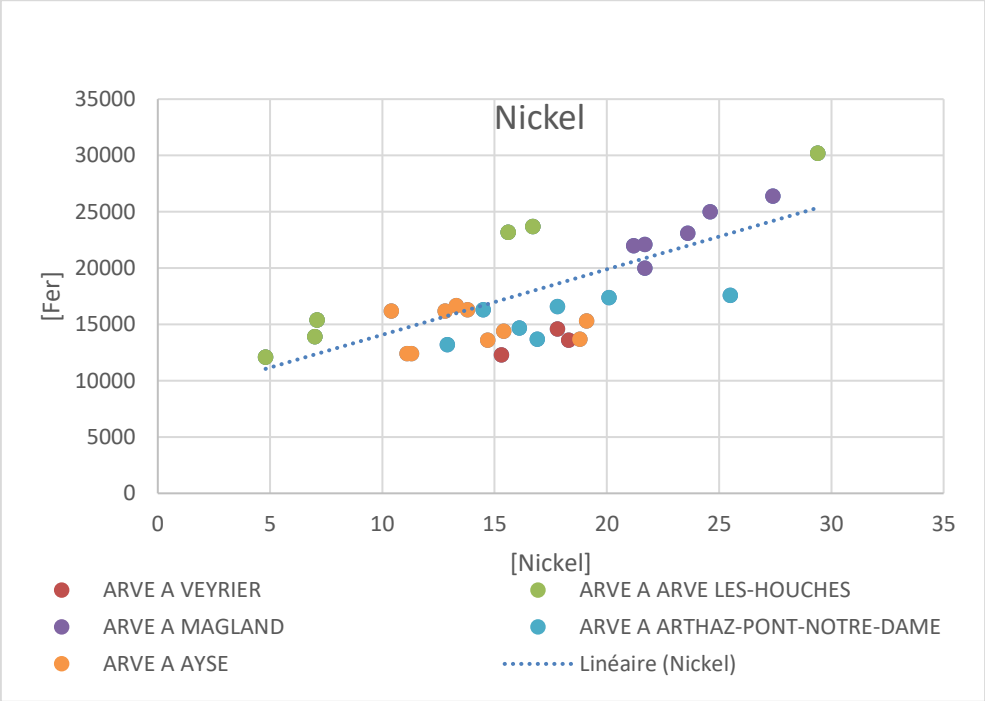
11. Liste des substances prioritaires dont le suivi commence entre 2000 et 2005 dans le bassin versant de l'Arve

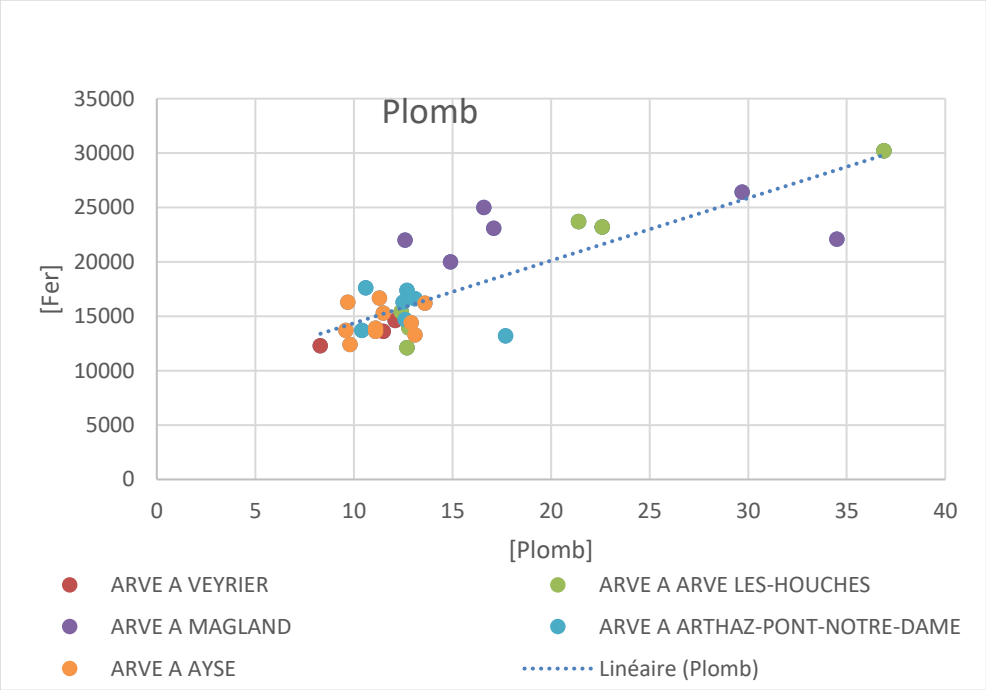
Alachlore, Anthracène, Benzène, Benzo(a)pyrène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Chlorfenvinphos, Composés du tribulétain, Di(2-ethylhexyl)phtalate, Diuron, Fluoranthène, Hexachlorobutadiène, Indeno(1,2,3-cd)pyrène, Isoproturon, Naphthalène, Octylphénols, Pentachlorobenzène, Trifluraline.

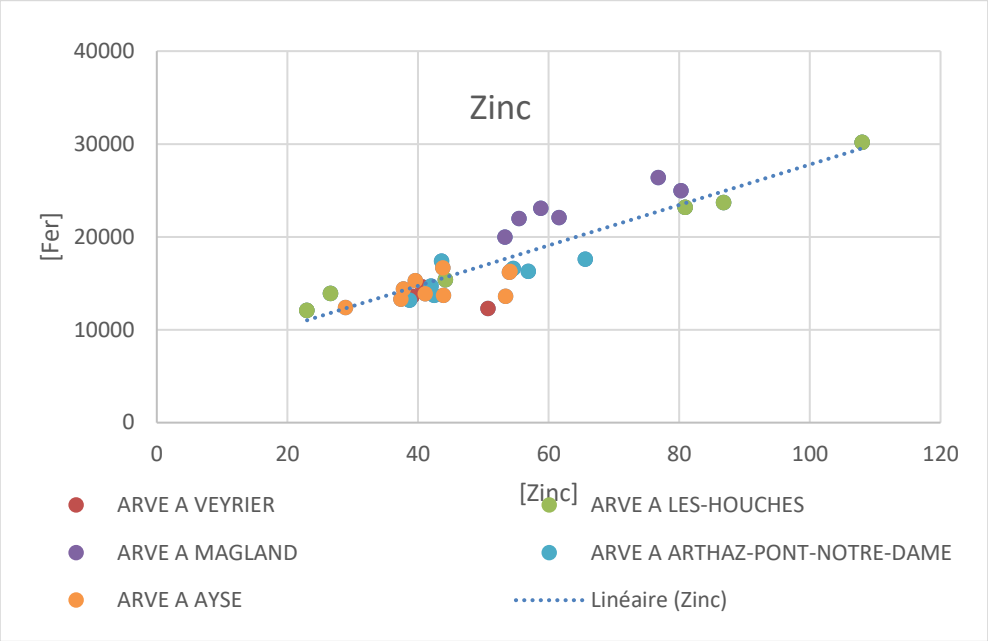
12. Graphiques de corrélation entre éléments traces métalliques et le fer

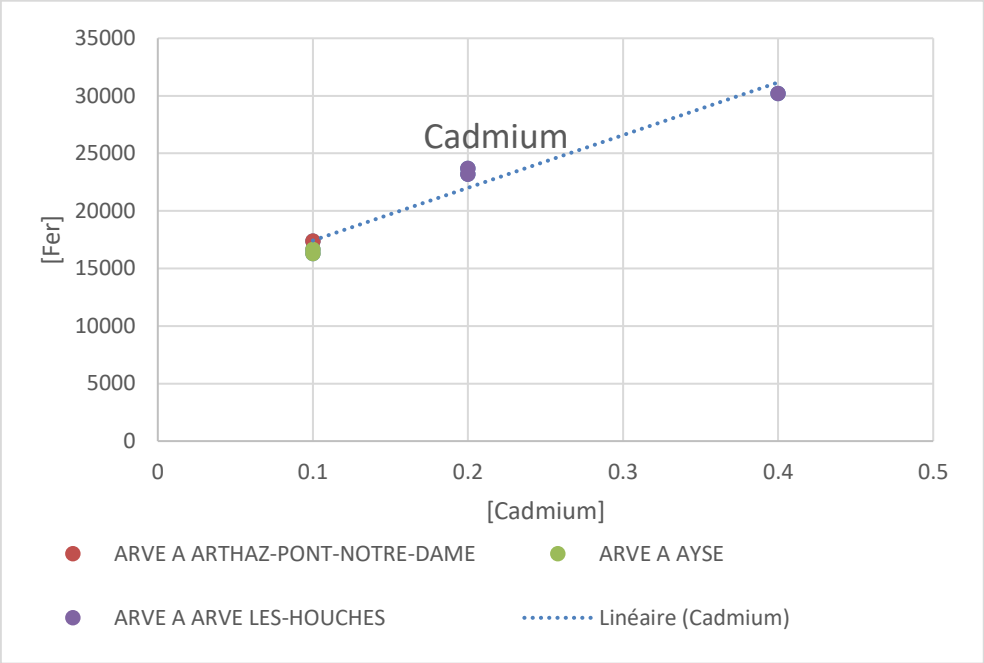





Nickel
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
[Fer]
0
5
10
15
20
25
30
35
[Nickel]
ARVE A VEYRIER
ARVE A ARVE LES-HOUCHES
ARVE A MAGLAND
ARVE A ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME
ARVE A AYSE
Linéaire (Nickel)


Plomb
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
[Fer]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
[Plomb]
ARVE A VEYRIER
ARVE A ARVE LES-HOUCHES
ARVE A MAGLAND
ARVE A ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME
ARVE A AYSE
Linéaire (Plomb)


Zinc
[Fer]
40000
30000
20000
10000
0
0
20
40
60
80
100
120
[Zinc]
ARVE A VEYRIER
ARVE A LES-HOUCHES
ARVE A MAGLAND
ARVE A ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME
ARVE A AYSE
Linéaire (Zinc)


Cadmium
[Fer]
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
[Cadmium]
ARVE A ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME
ARVE A AYSE
ARVE A ARVE LES-HOUCHES
Linéaire (Cadmium)

13. Ratios de diagnostics utilisés pour l'estimation des sources de HAP

	Valeur	Source	Référence
Phe/Ant	<10	Pyrolytique	Budzinski *et al.* (1997)
	>15	Pétrogénique	
Fla/Pyr	≥1	Pyrolytique	Doong et Lin (2004)
	<1	Pétrogénique	
Chy/BaA	<1	Pyrolytique	Zeng et Vista (1997)
	>1	Pétrogénique	
Fla/(Fla + Pyr)	<0.4	Pétrogénique	De La Torre-Roche *et al.* (2009)
	0.4 - 0.5	Combustion de pétrole	
	>0.5	Combustion de bois, charbon, végétaux	
BaA/(BaA + Chy)	0.2 – 0.35	Combustion de charbon	Akyüz et Çabuk (2008)
	>0.35	Trafic routier	
	<0.2	Pétrogénique	Yunker *et al.* (2002)
	>0.35	Combustion	
IdP/(IdP + BghiP)	<0.2	Pétrogénique	Yunker *et al.* (2002)
	0.2-0.5	Combustion de pétrole	
	>0.5	Combustion de bois, charbon, végétaux	
Ant/(Ant + Phe)	<0.1	Pétrogénique	Liu *et al.* (2008)
	>0.1	Pyrolytique	

Figure 43 : Ratios de diagnostics utilisés pour l'estimation des sources de HAP d'après (Poulier et al., n.d.)

14. Liste des paramètres recherchés et date de début de recherche

Compte tenu du nombre important de paramètres, vous pourrez trouver la liste des paramètres selon le support grâce au lien QR code dédié à l'exception des paramètres bryophytes.

Pour l'eau brute :

Pour la phase aqueuse :

Pour les sédiments :

Pour les bryophytes :

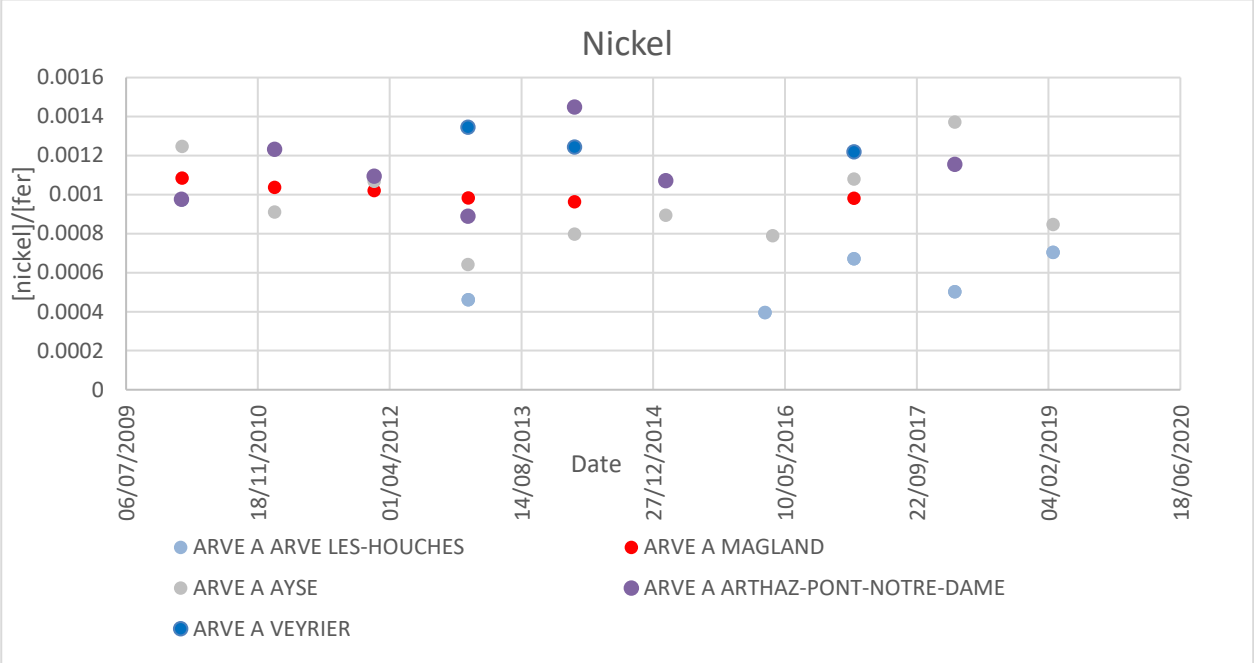
Arsenic	1988
Plomb	1988
Zinc	1988
Nickel	1988
Mercure	1988
Cadmium	1988
Chrome	1988
Cuivre	1988
Arsenic	1988
Aluminium	2012
Fer	2012

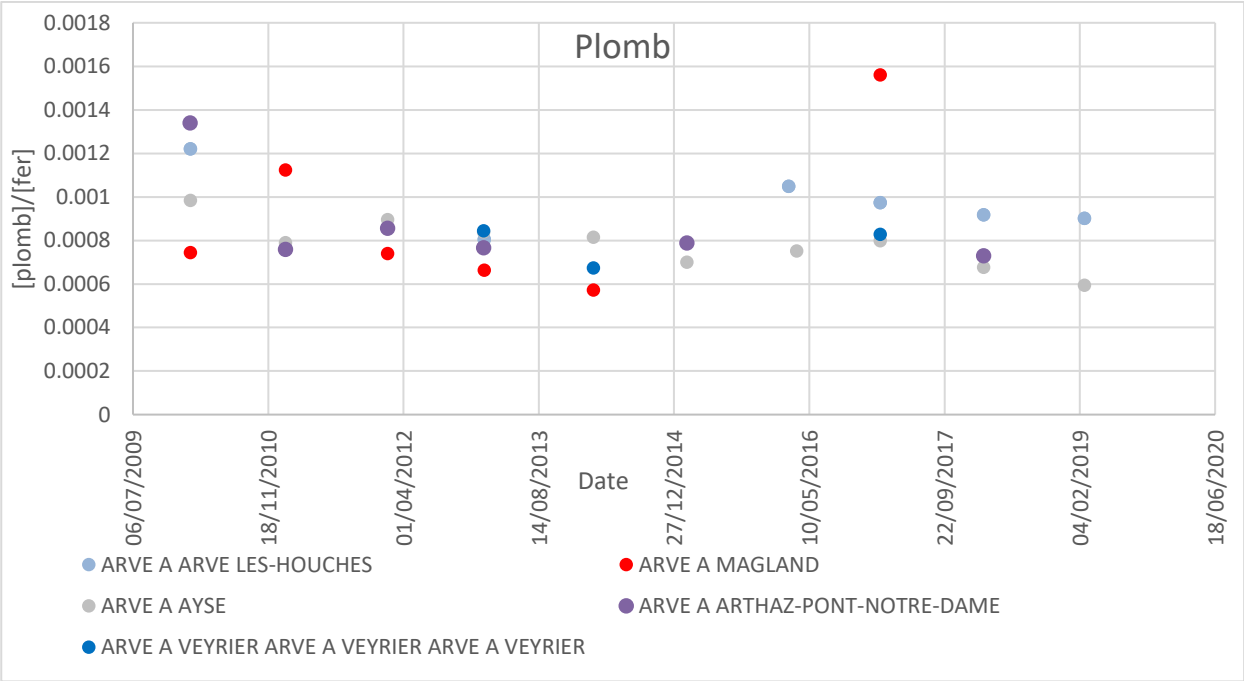
15. Corrélation métaux et fer

Tableau 12 : Corrélation entre les ETM et le fer aux principales du bassin versant de l'Arve

	Arsenic		Chrome		Cuivre		Nickel	
	R²	P-val	R²	P-val	R²	P-val	R²	P-val
Toutes	0.57	4.1e-08	0.002	0.8	0.60	8.7e-	0.54	1.7e-
Les Houches	0.88	0.005	0.05	0.67	0.85	0.009	0.96	0.0007
Magland	0.05	0.66	0.05	0.66	0.37	0.20	0.84	0.01
Ayse	0.03	0.64	0.06	0.47	0.04	0.58	0.0005	0.95
Pont Notre-Dame	0.30	0.202	0.39	0.14	0.5	0.08	0.5346	0.06
Nombre de mesures	38		38		38		38	
	Plomb		Zinc		Cadmium		Mercure	
	R²	P-val	R²	P-val	R²	P-val	R²	P-val
Toutes	0.70	4.85e-	0.84	4e-16	0.95	0.0008	0.004	0.87
Les Houches	0.92	0.003	0.98	0.0001	Données insuffisantes			
Magland	0.12	0.51	0.82	0.013				
Ayse	0.04	0.60	0.36	0.07				
Pont Notre-Dame	0.20	0.31	0.54	0.06				
Nombre de mesures	38		38		6		9	

16. Résultats de la normalisation du nickel, plomb et zinc avec le fer





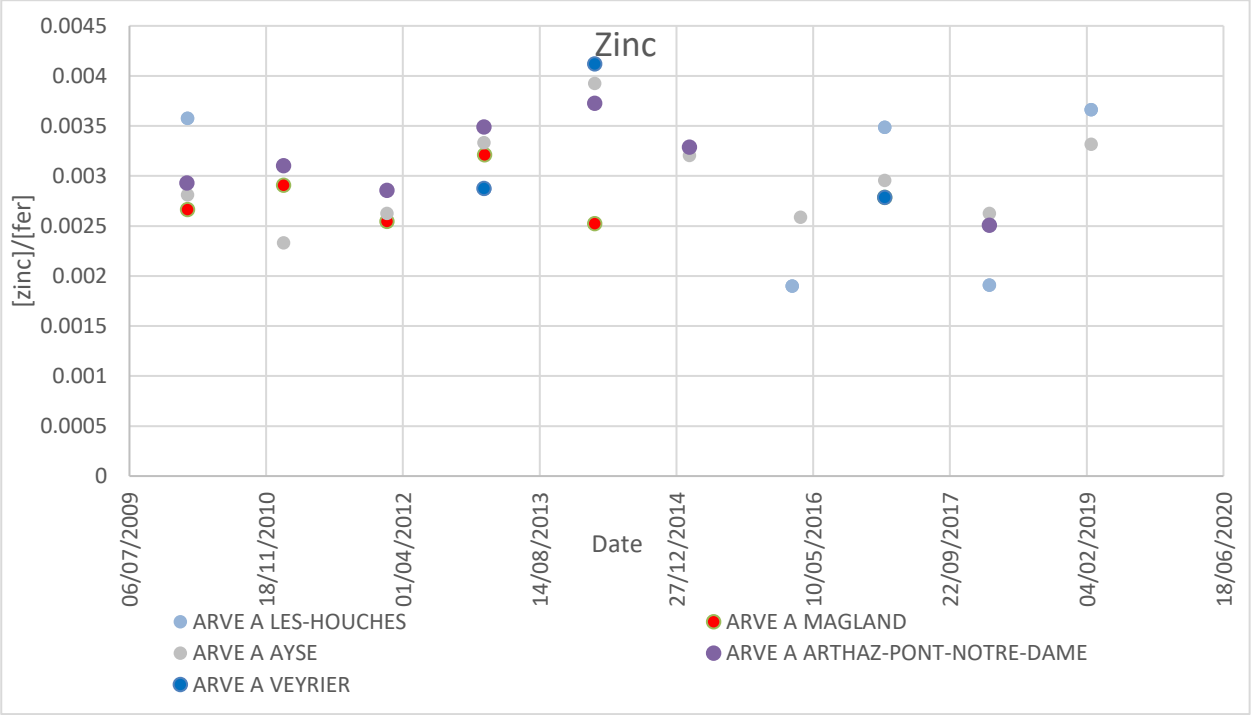


Figure 44 : Résultats de la normalisation pour le nickel, le plomb et le zinc

17. Comparaison et évolution des concentrations en ETM dans les bryophytes aux principales stations du bassin versant de l'Arve

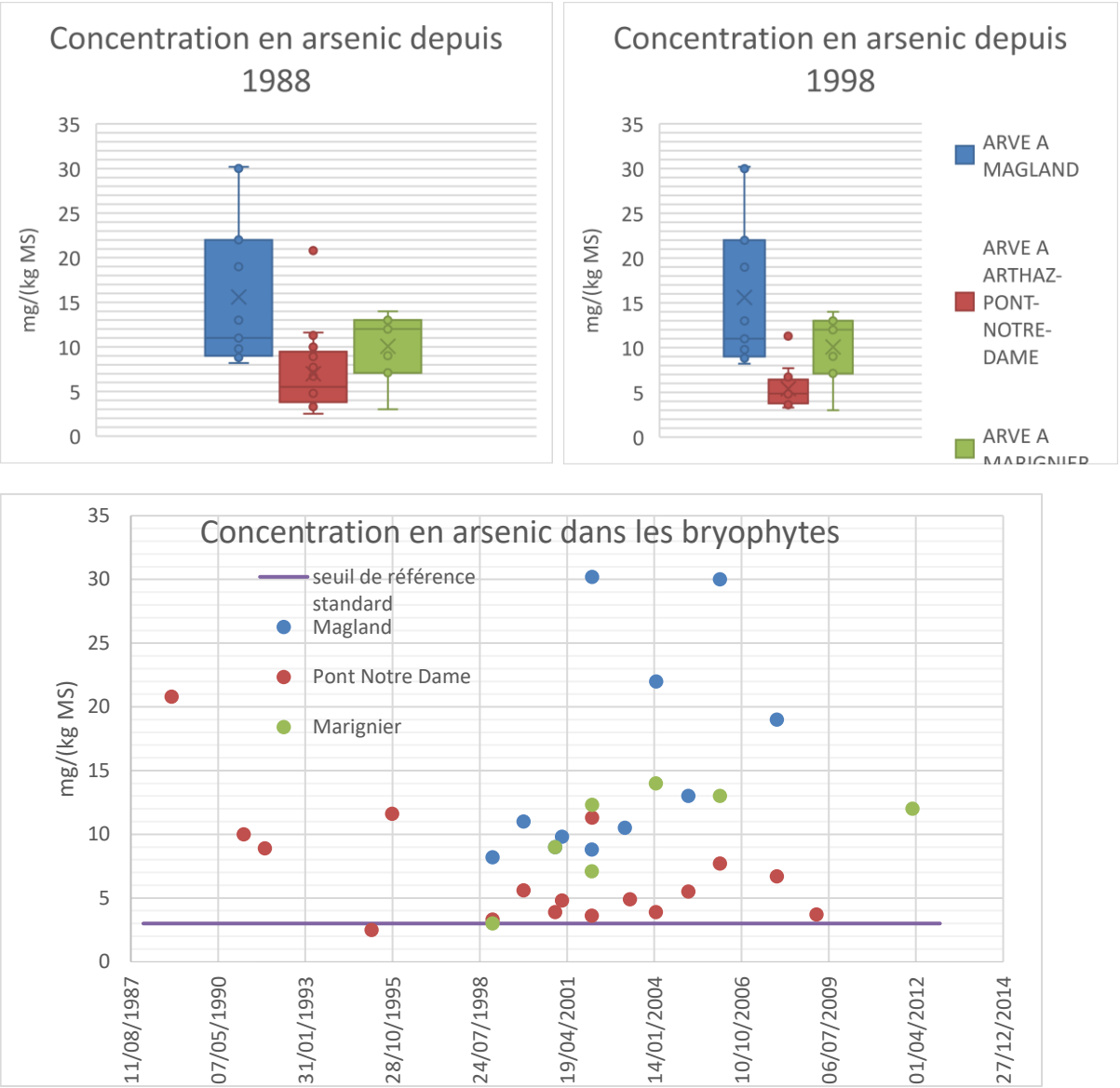
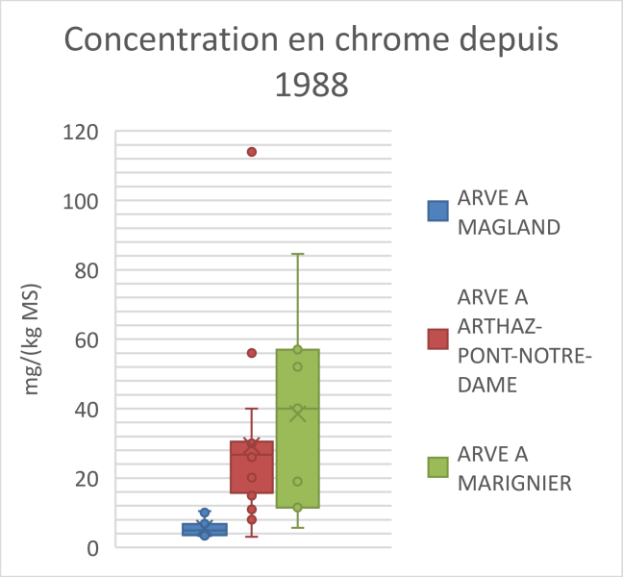
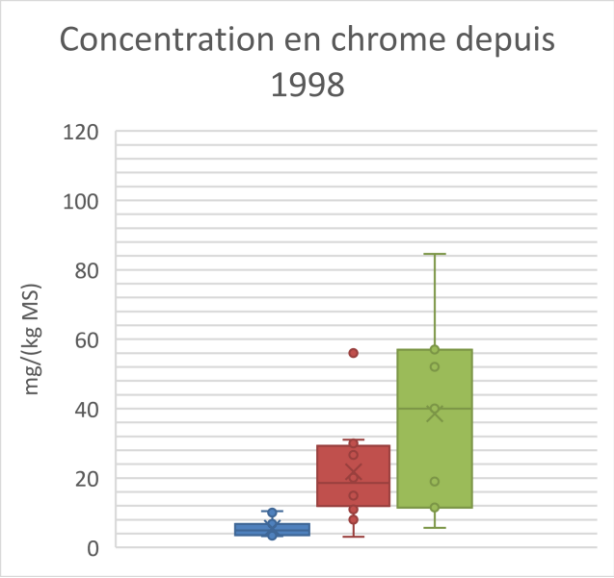


Figure 45 : Évolution dans le temps des concentration en arsenic dans les bryophytes des principales stations du bassin versant de l'Arve





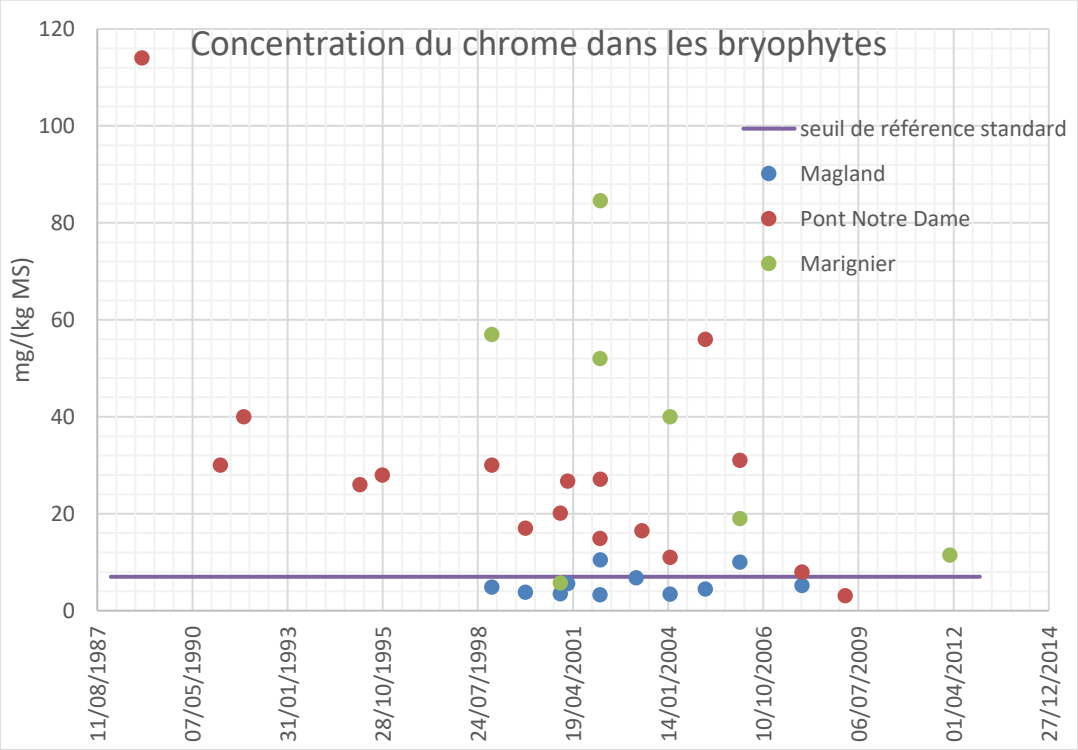
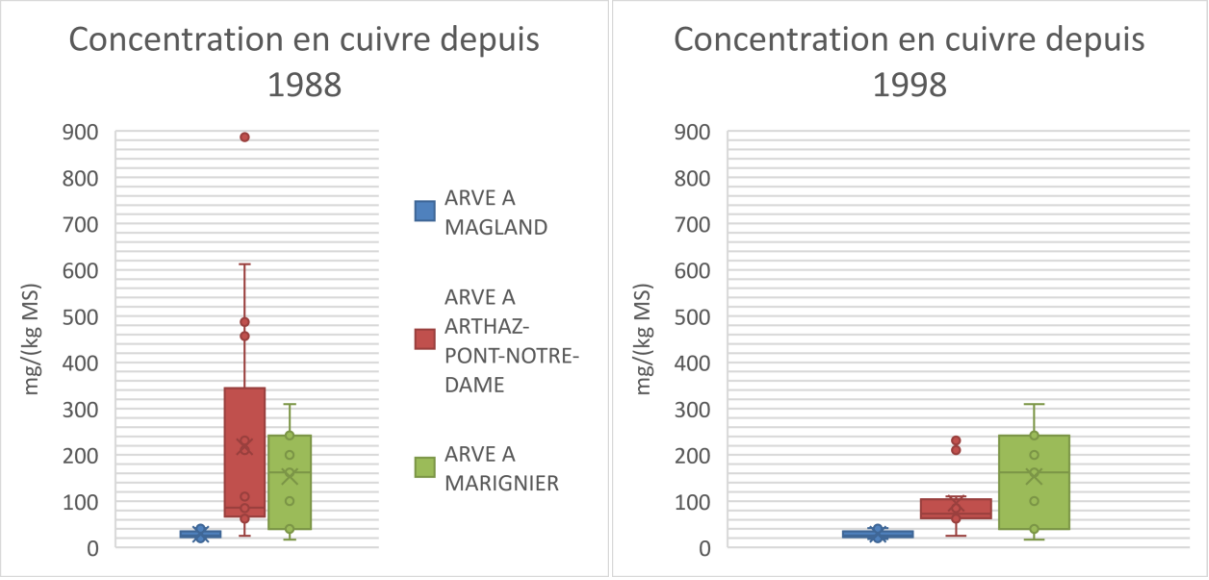


Figure 46 : Évolution dans le temps des concentration en chrome dans les bryophytes des principales stations du bassin versant de l'Arve



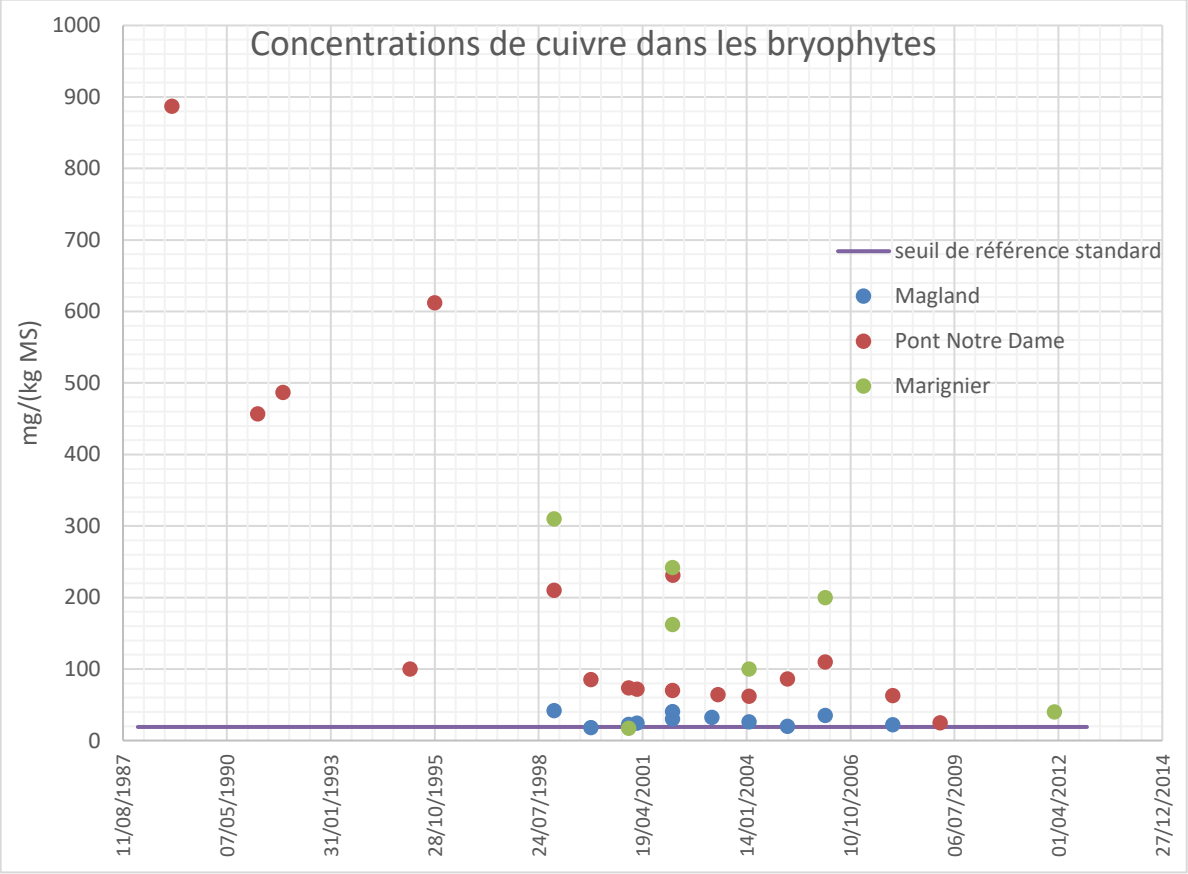


Figure 47 : Évolution dans le temps des concentration en cuivre dans les bryophytes des principales stations du bassin versant de l'Arve

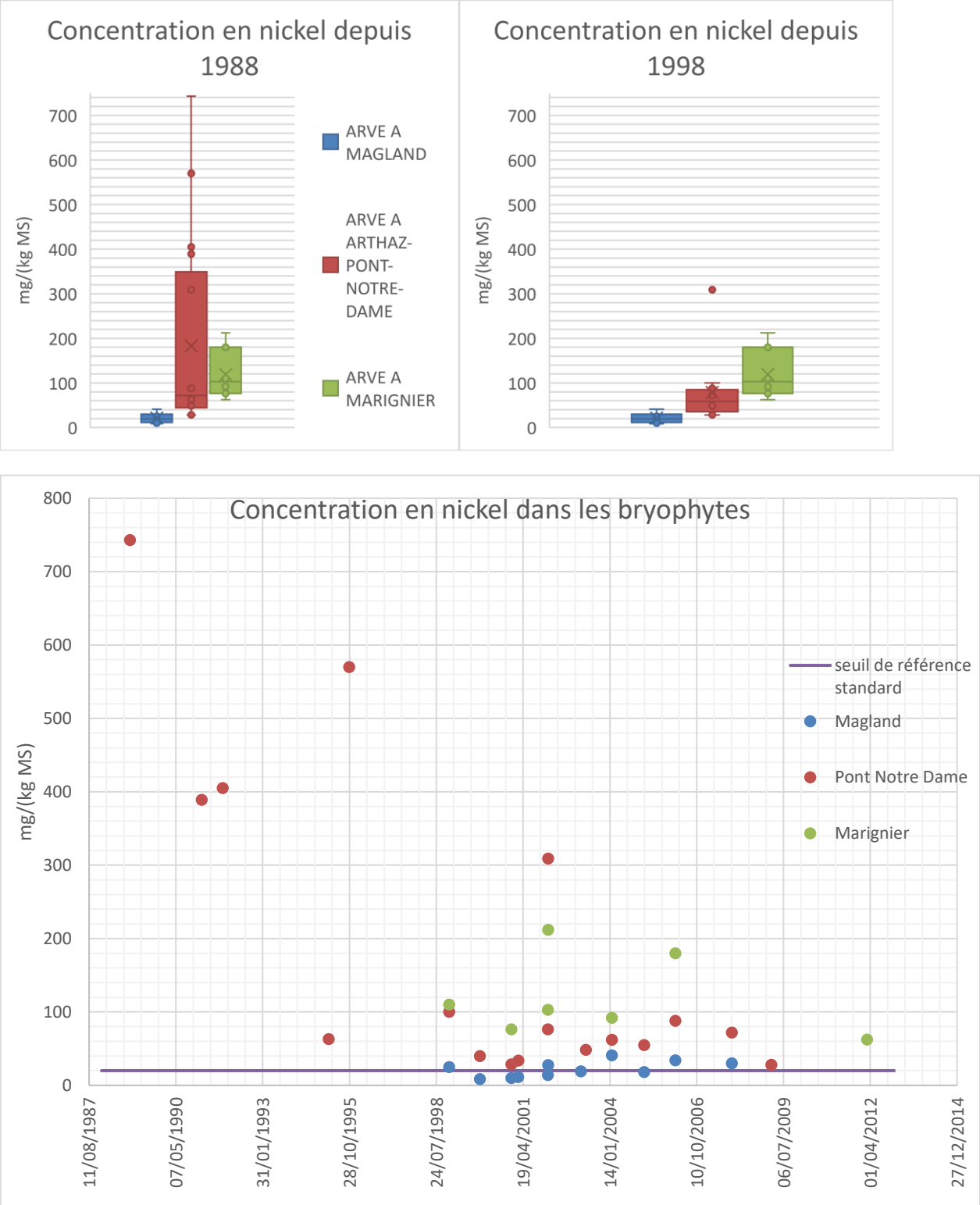


Figure 48 : Évolution dans le temps des concentration en nickel dans les bryophytes des principales stations du bassin versant de l'Arve

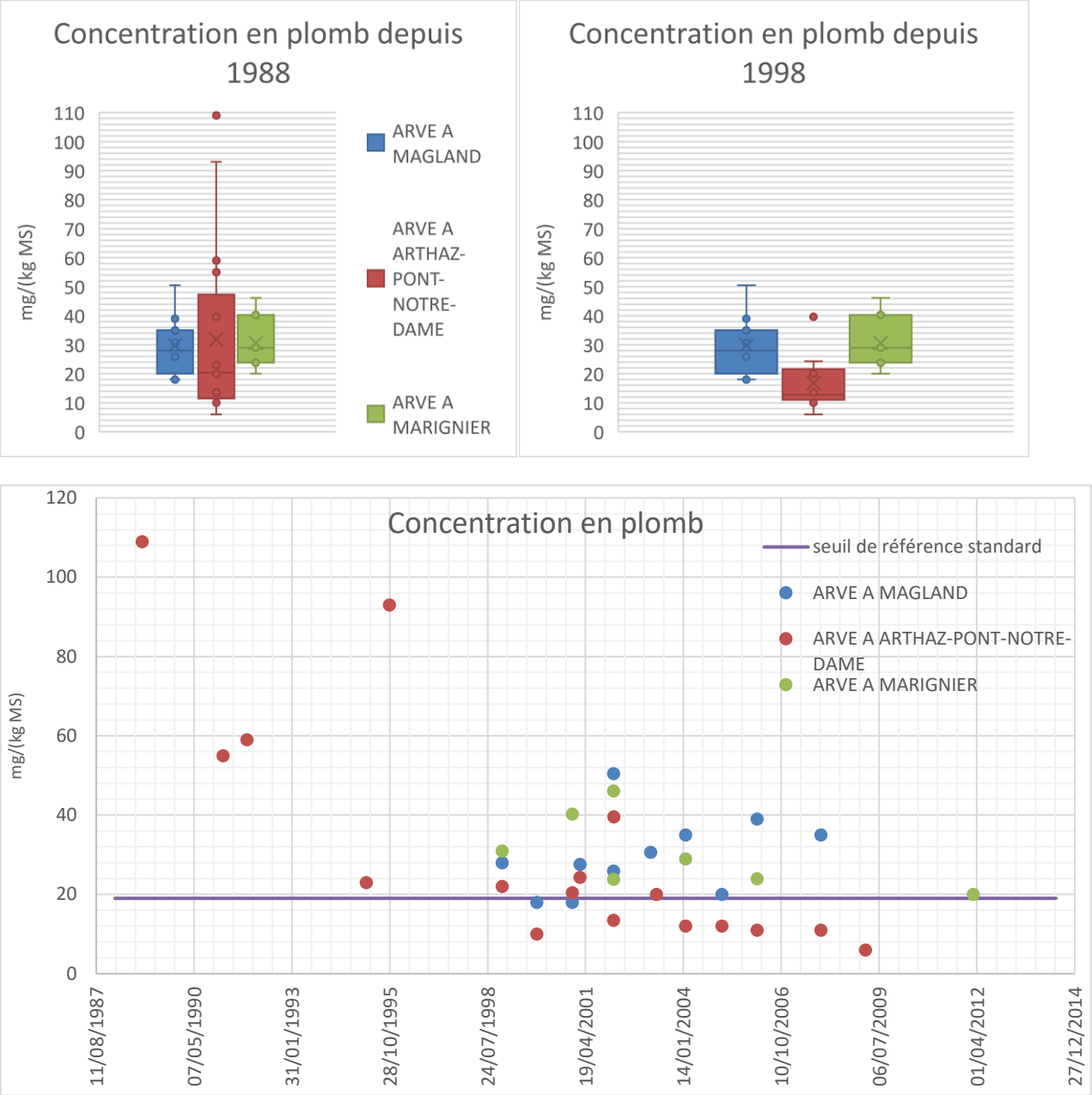


Figure 49 : Évolution dans le temps des concentration en plomb dans les bryophytes des principales stations du bassin versant de l'Arve

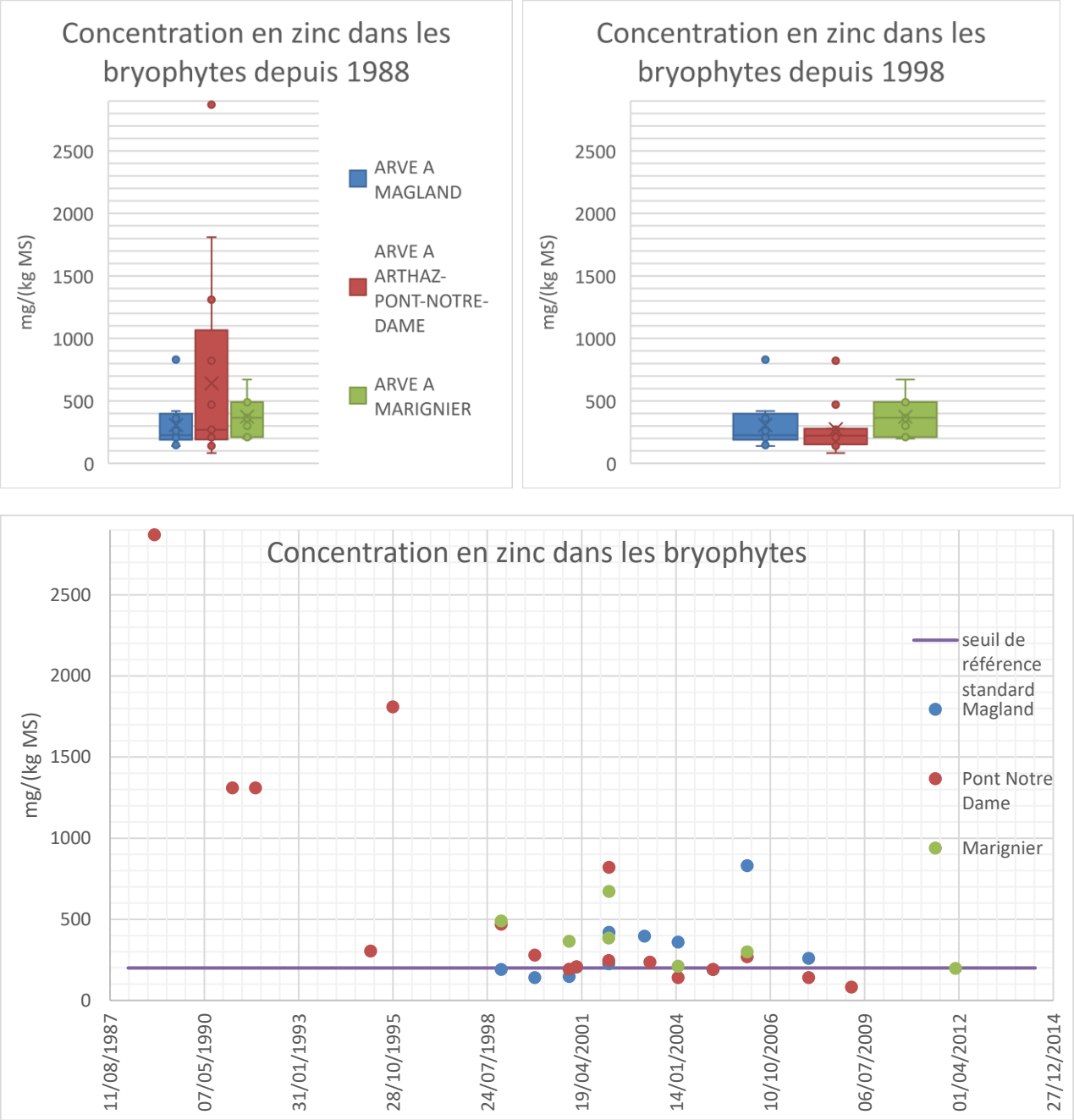
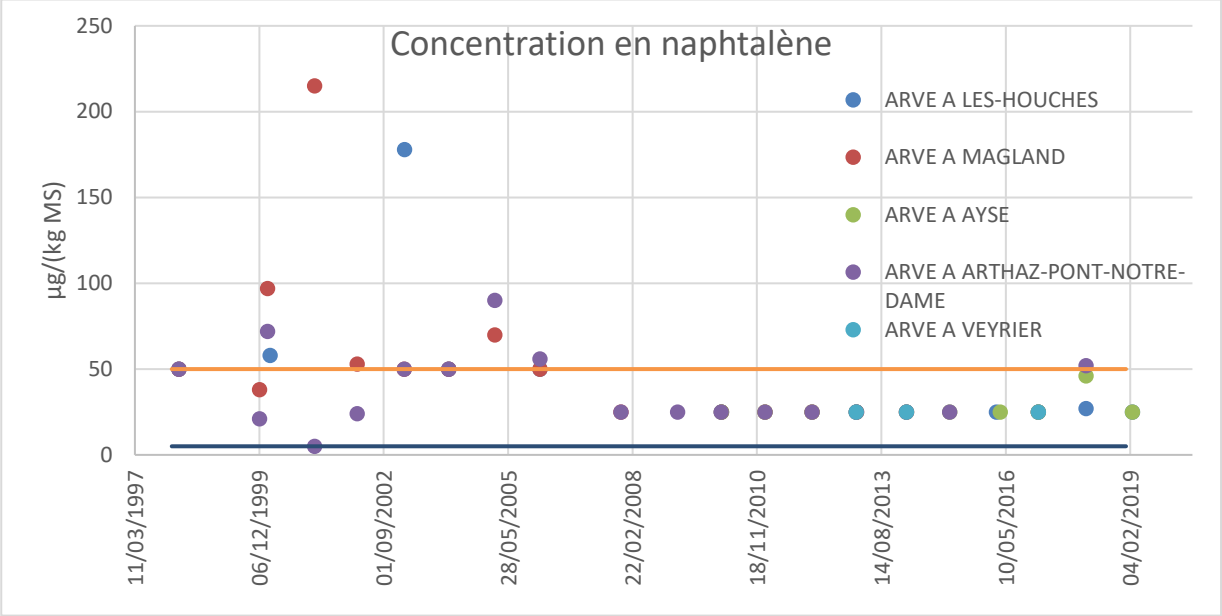


Figure 50 : Évolution dans le temps des concentration en zinc dans les bryophytes des principales stations du bassin versant de l'Arve

18. Évolution dans le temps des concentrations en HAP pour les principales stations du bassin versant de l'Arve



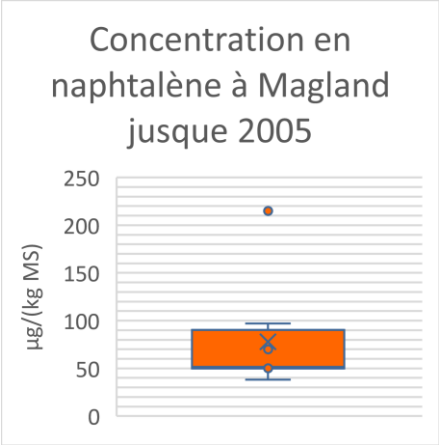
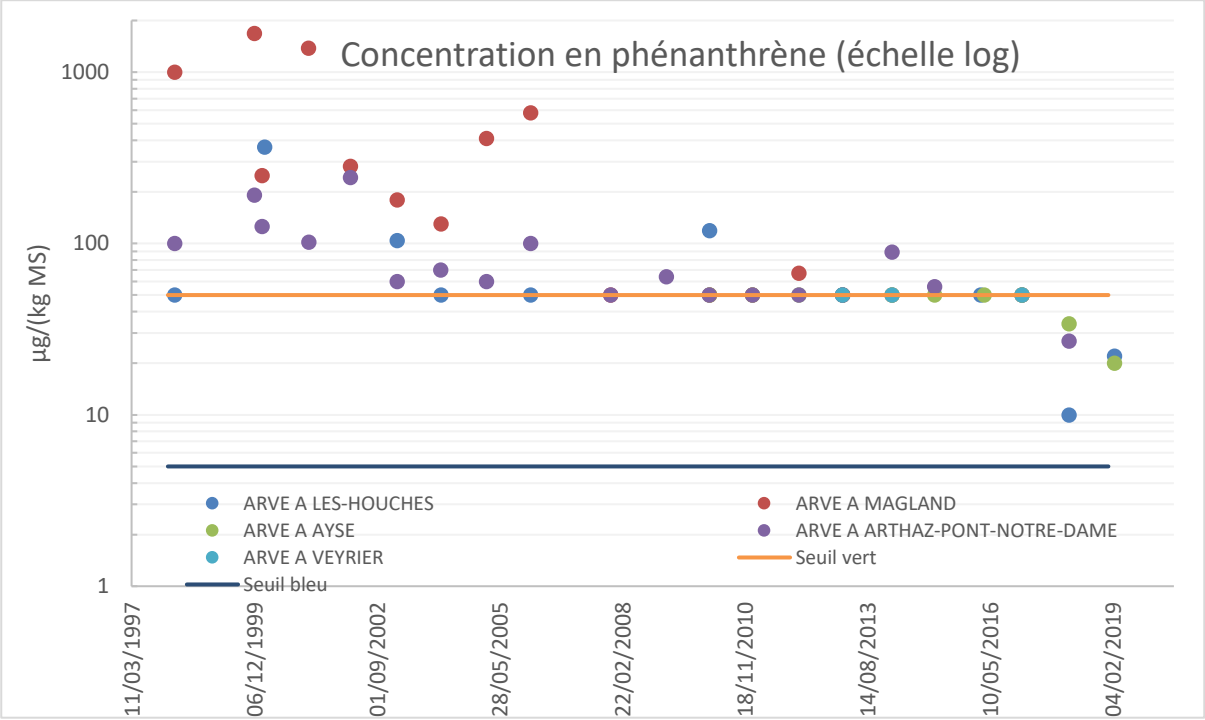


Figure 51 : Évolution dans le temps des concentrations en naphtalène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



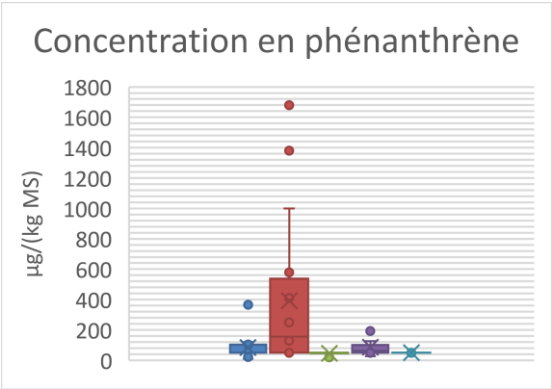
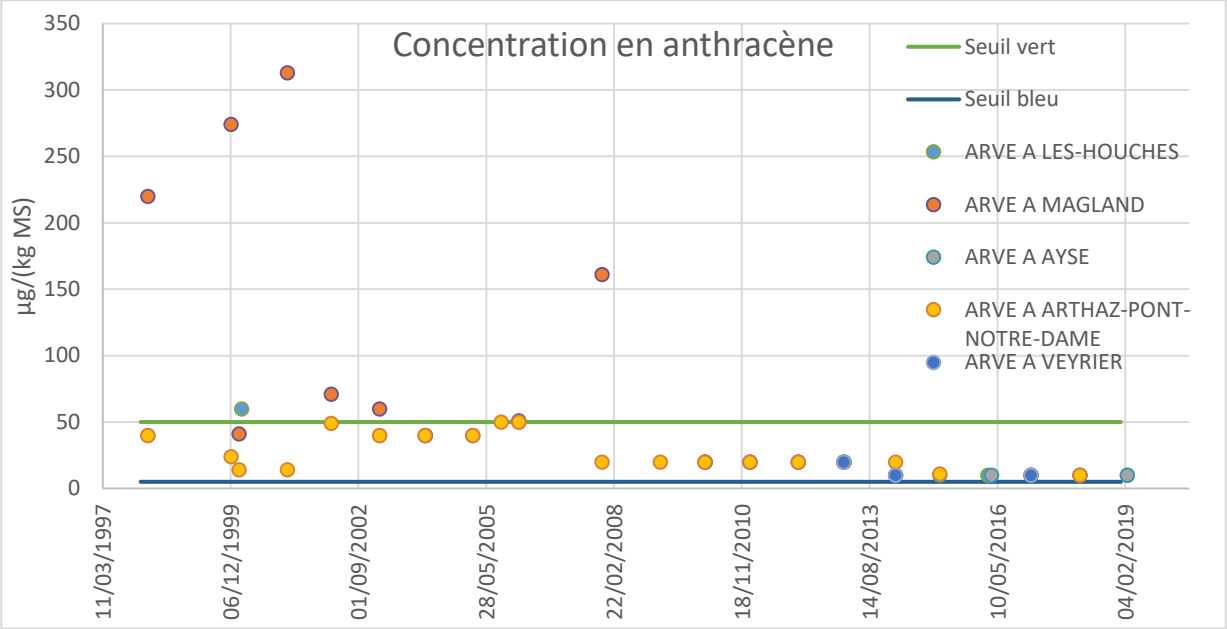


Figure 52 : Évolution dans le temps des concentrations en phénanthrène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



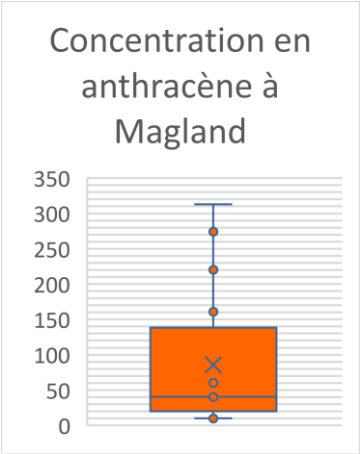
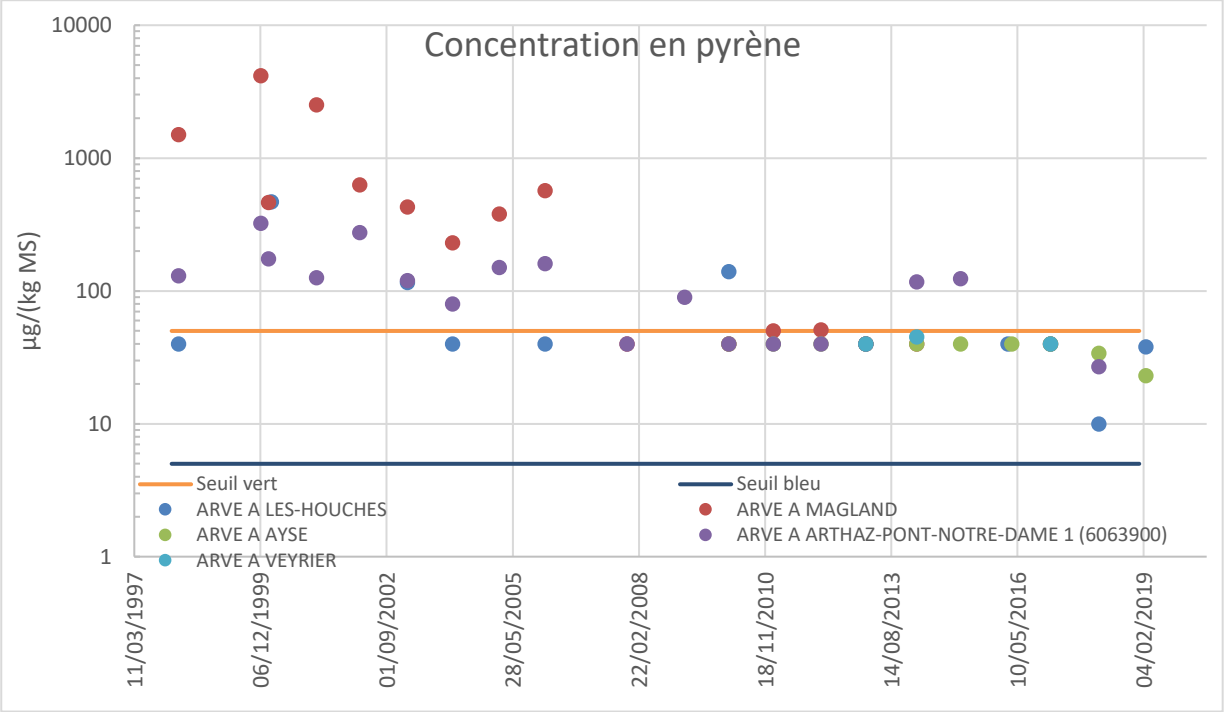


Figure 53 : Comparaison des concentrations en anthracène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



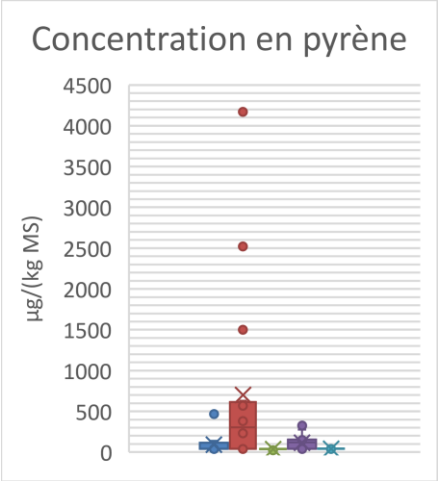
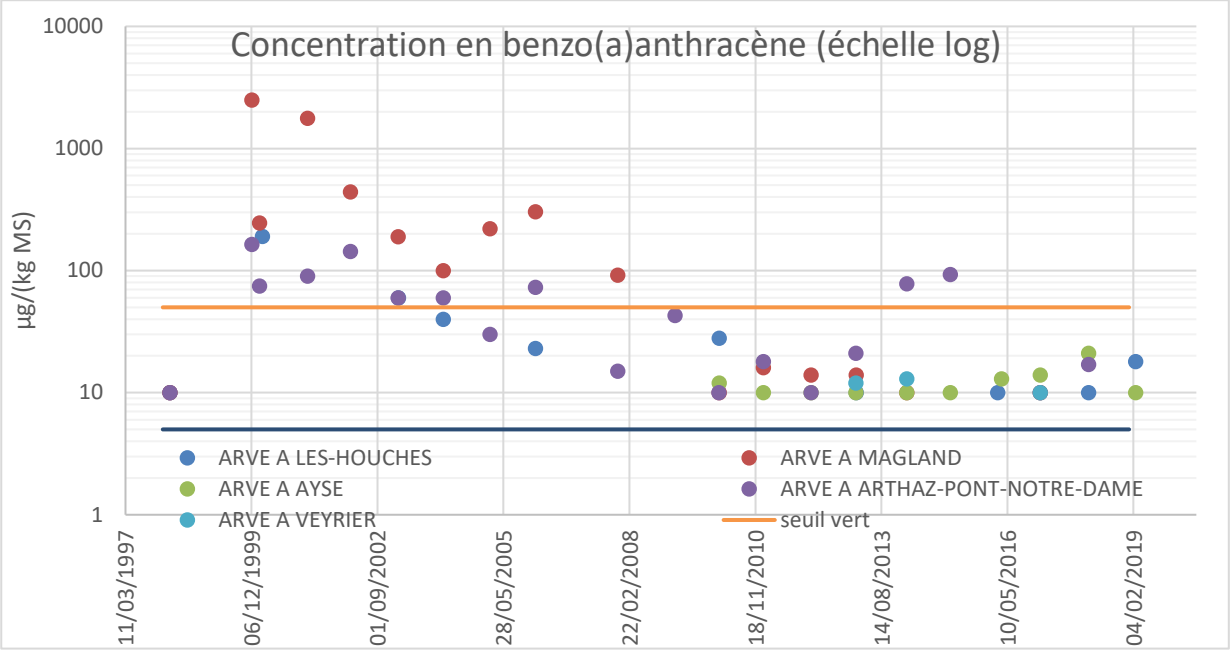


Figure 54 : Évolution dans le temps des concentrations en pyrène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



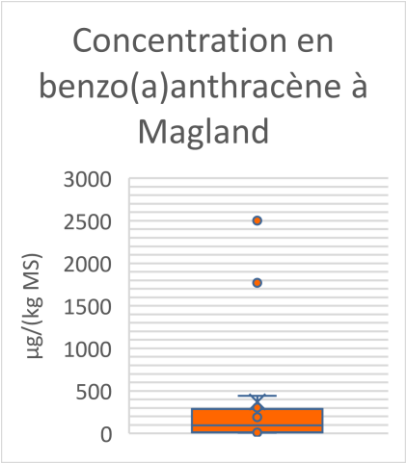
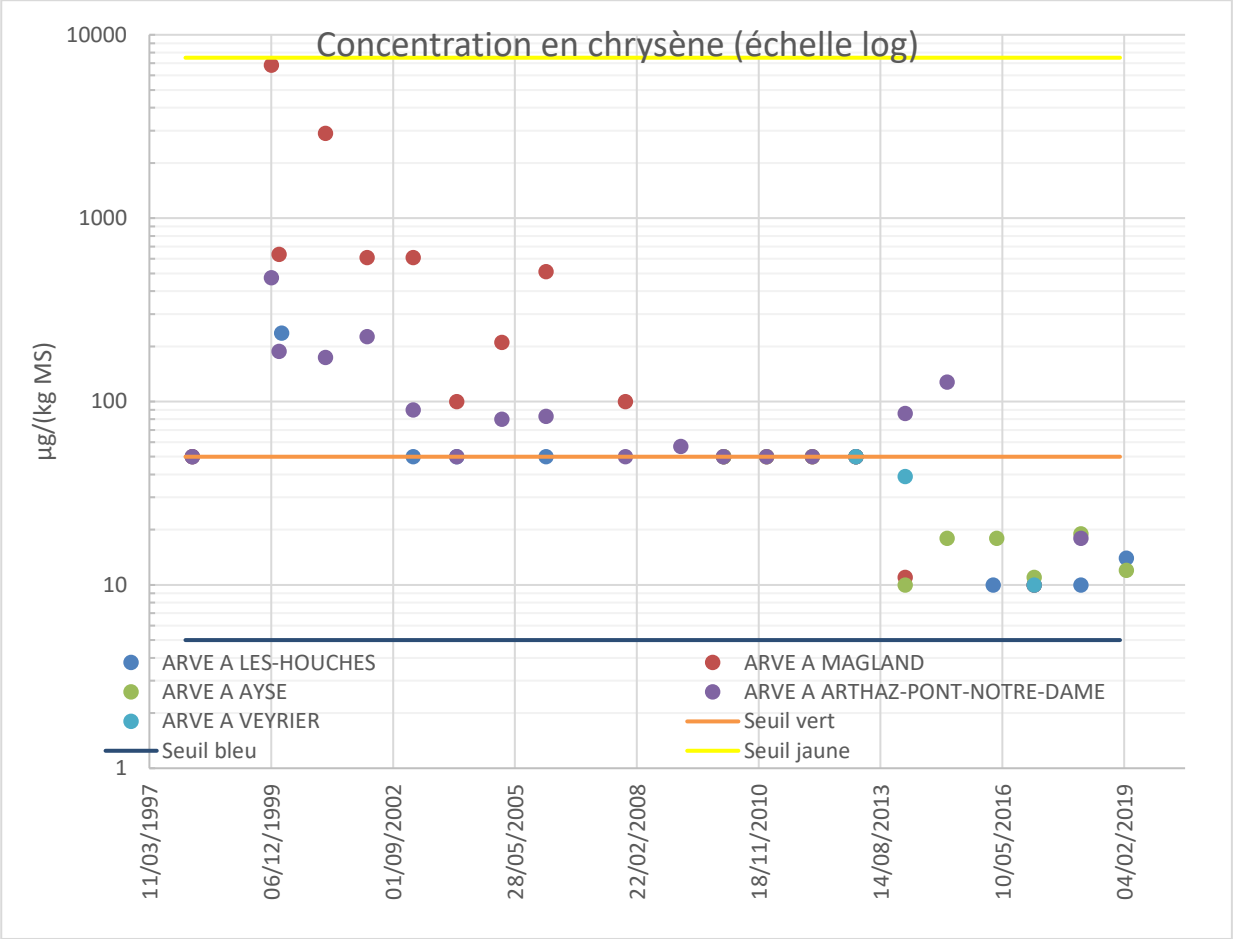


Figure 55 : Évolution dans le temps des concentrations en benzo(a)anthracène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



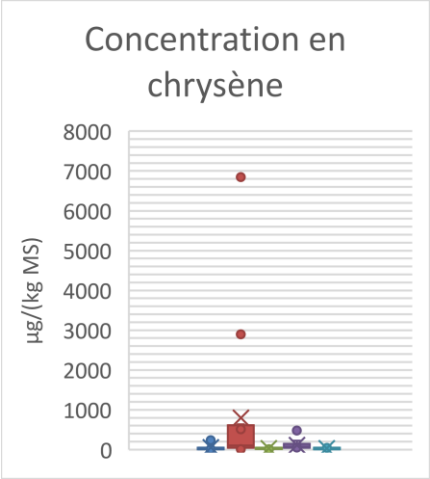
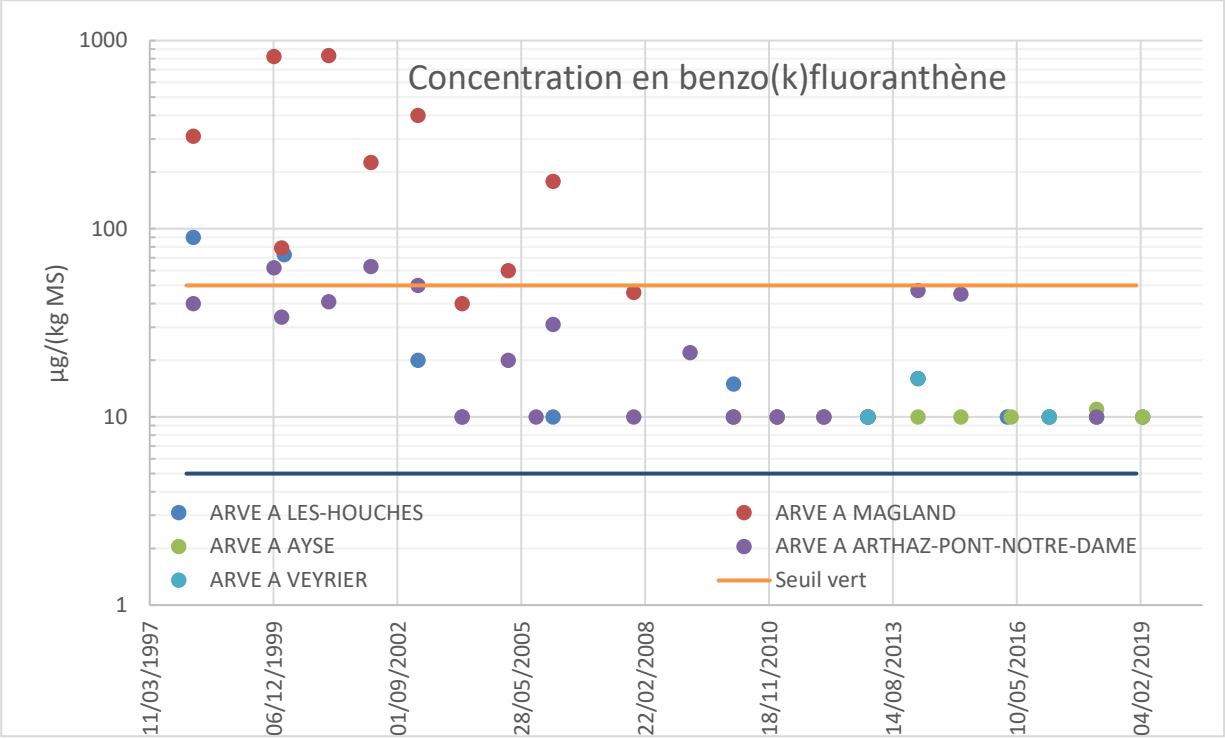


Figure 56 : Évolution dans le temps des concentrations en chrysène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



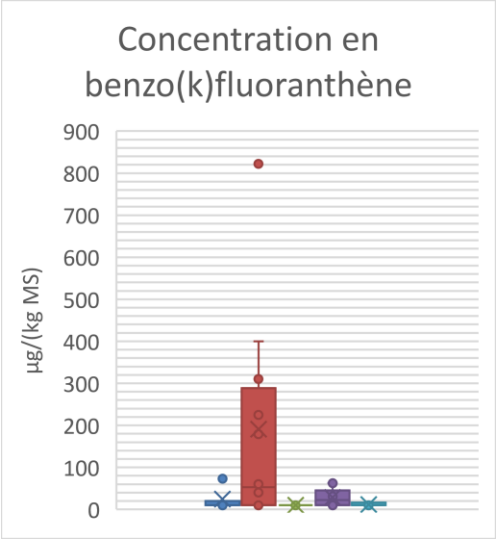
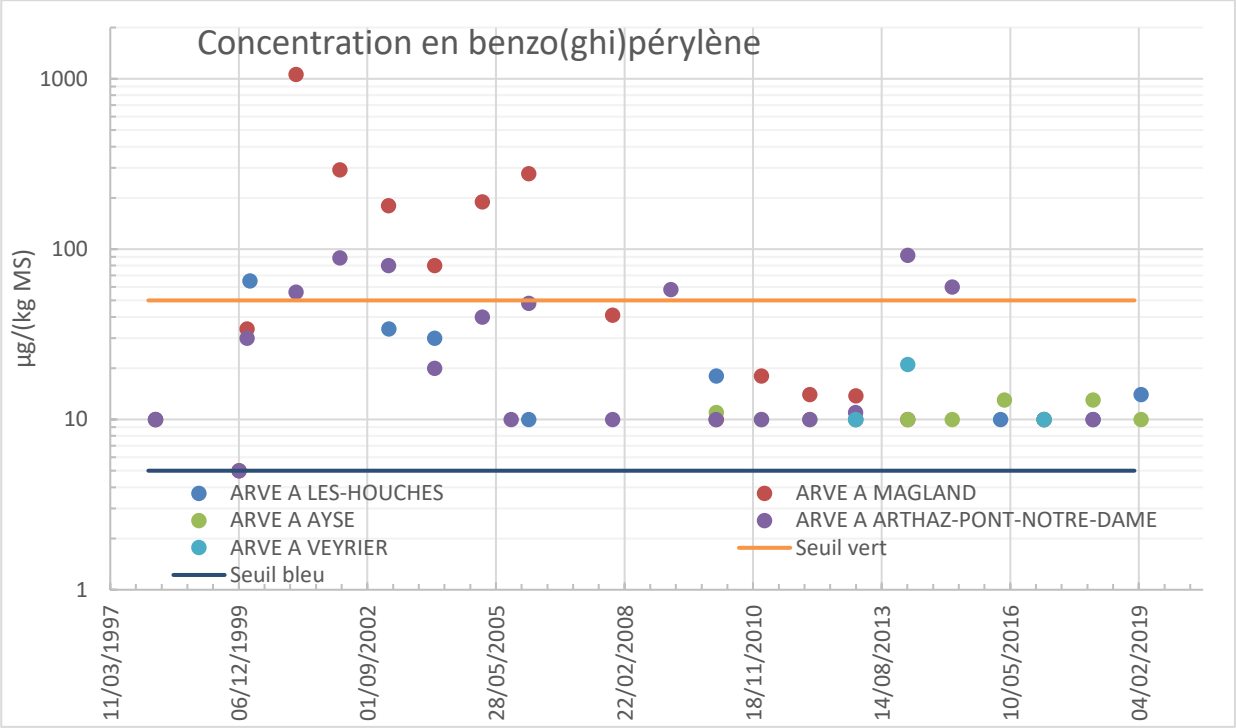


Figure 57 : Évolution dans le temps des concentrations en benzo(k)fluoranthène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



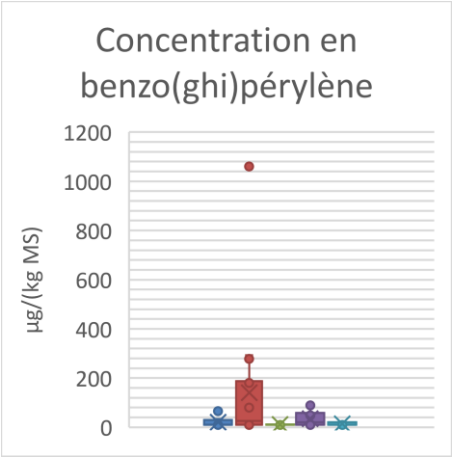


Figure 58 : Évolution dans le temps des concentrations en benzo(ghi)pérylène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve

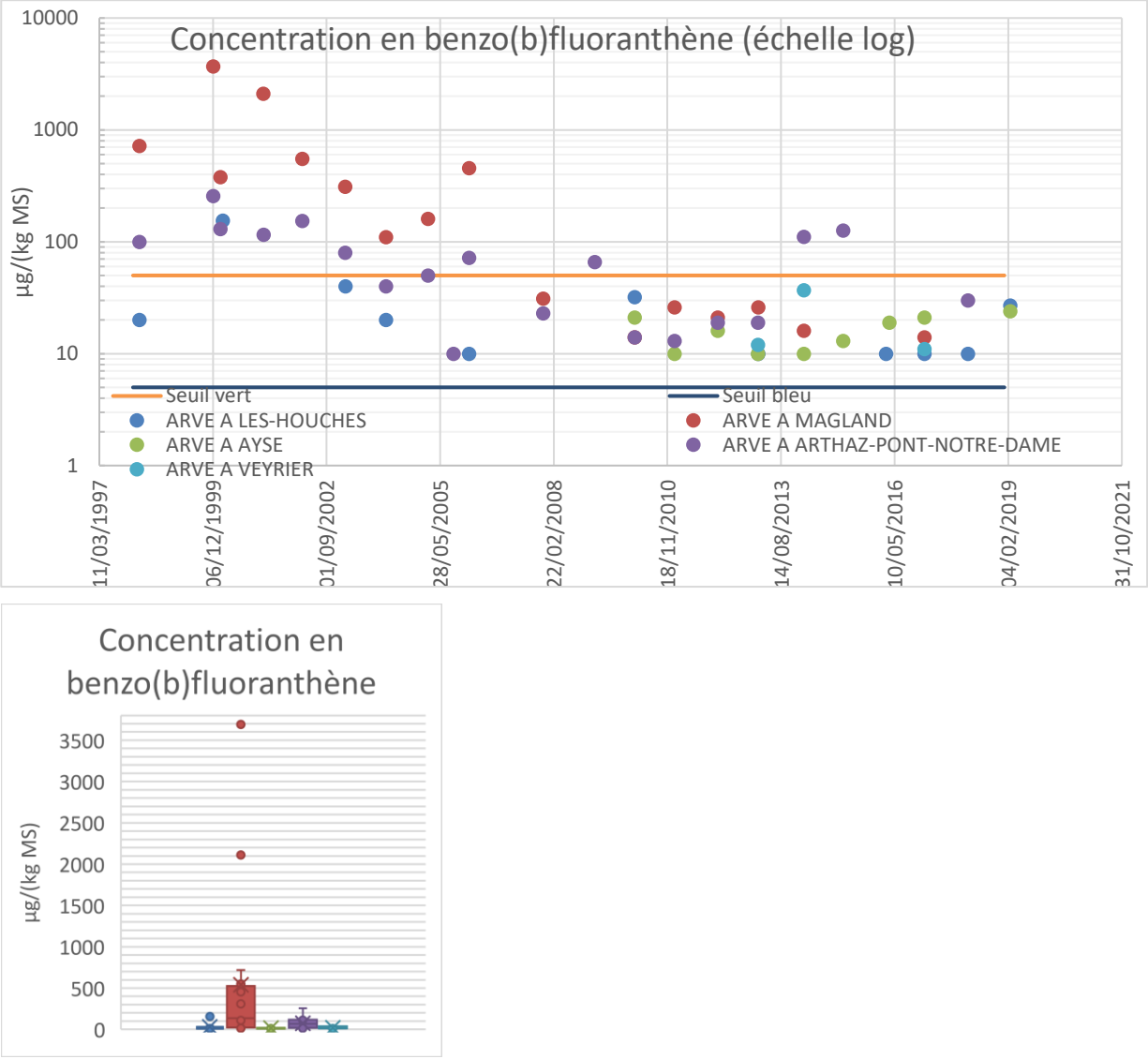
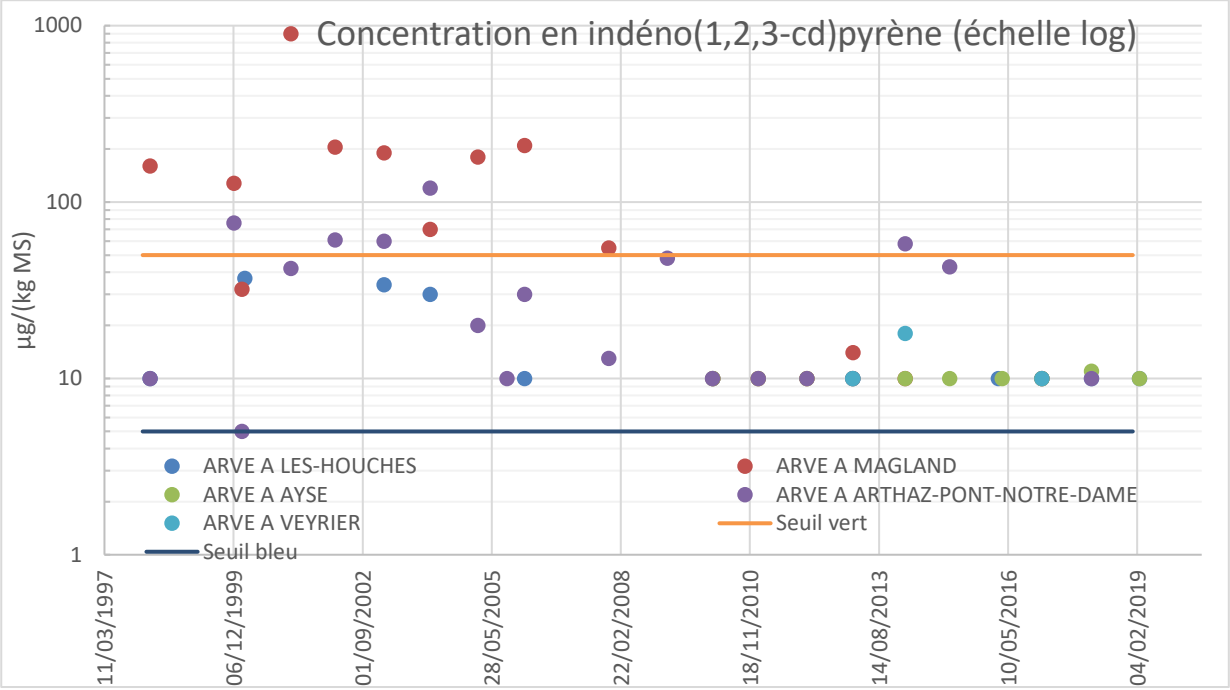


Figure 59 : Évolution dans le temps des concentrations en benzo(b)fluoranthène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve



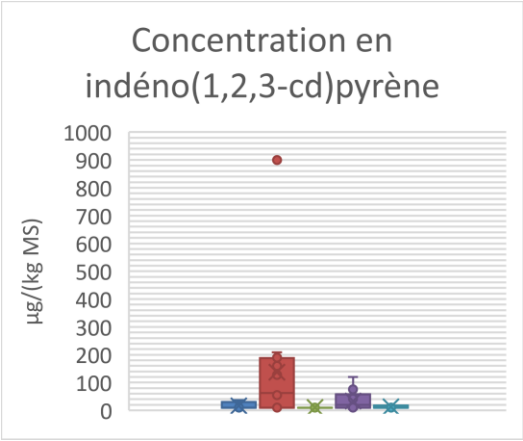


Figure 60 : Évolution dans le temps des concentrations en indéno(1,2,3-cd)pyrène dans les sédiments des principales stations du bassin versant de l'Arve

19. Liste des producteurs identifiés de données Naïades pour le bassin versant de l'Arve

AERM&C

CC Vallée verte

CC du Genevois

CONSEIL DÉPARTEMENTAL de Haute-Savoie

DDT – Parc départemental Annecy le Vieux

DDAF de la Haute-Savoie

SIVOM du Haut-Giffre

SIVU pour l'aménagement et l'entretien du Foron du Chablais-Genevois

Syndicat Intercommunal d'Aménagement et d'Entretien Arve et ses berges

SM3A