

Apports vers le Doubs de polluants et nutriments à partir du bassin versant suisse



Bilan de Flux – Rapport final

Mars 2016

Etude sur mandat de l'Office Fédéral de l'Environnement
(OFEV), 3003 Berne

Mentions légales

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), division eaux, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: HOLINGER SA, ENVILAB SA

Auteurs: Christian Götz, Nicolas Füllemann, Jürg Schweizer

Accompagnement OFEV : Patrizia Dazio, Daniel Hefti, Andreas Knutti, Manuel Kunz, Evelyne Marendaz Guignet, Ulrich Sieber

Remarque: La présente étude / le présent rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

HOLINGER SA / ENVILAB AG

Route de la Pierre 22, CH-1024 Ecublens

Téléphone +41 (0)21 654 91 00, Télécopie +41 (0)21 654 91 01

lausanne@HOLINGER.com

Version	Date	Fichier	Validation	Distribution
1.0	11.05.2015	A2030	SCJ	HOLINGER, SENE, ENV, OFEV
2.0	22.09.2015	A2030	SCJ ; GOC	HOLINGER, SENE, ENV, OFEV
3.0	17.10.2015	A2030	SCJ ; GOC	HOLINGER, SENE, ENV, OFEV
4.0	23.12.2015	A2030	SCJ ; GOC	HOLINGER, SENE, ENV, OFEV
5.0	11.03.2016	A2030	SCJ ; GOC	HOLINGER, SENE, ENV, OFEV

P:\PROJETS EN

COURSA2030_OFEV_bassin_versant_Doubs\Administration\Rapports\V4\A2030_Rapport_Doubs_Bilan_de_flux_20151223.docx

Photo page de titre: Saut du Doubs, tiré de <http://de.franche-comte.org>

Table des matières

0	RÉSUMÉ	7
1	INTRODUCTION ET CADRE DU PROJET	9
1.1	Contexte général	9
1.2	Objectifs de l'étude	10
1.3	Périmètre d'étude	11
1.4	Substances étudiées	12
2	ETAT DES LIEUX	13
2.1	Etudes existantes	13
2.1.1	Observation nationale de la qualité des eaux de surface (NAWA)	13
2.1.2	Projet intégré Doubs, Etat des lieux, diagnostic du bassin versant, 2011	13
2.1.3	Bassin du Doubs neuchâtelois, Diagnostic pluridisciplinaire, 2012	15
2.1.4	PsEaux, Module 33 : Cours d'eau - Doubs, BG, 2012	16
2.1.5	Synthèse des études existantes	17
2.2	Données préexistantes	17
2.2.1	Données de contrôle de la qualité des eaux	17
2.2.2	Débits mesurés par les stations hydrométriques	18
2.3	Données relevées dans le cadre de l'étude	19
2.3.1	Campagne de mesure « screening micropolluants »	19
2.3.2	Analyse des résultats de la campagne « screening micropolluants »	21
2.4	Analyse des données disponibles	23
2.4.1	Valeurs limites considérées pour l'évaluation de la qualité de l'eau	23
2.4.2	Analyse sommaire des mesures de concentrations disponibles par substance	25
	Micropolluants	26
2.4.3	Corrélation entre les concentrations et les débits mesurés	27
2.5	Limitations liées à l'hétérogénéité des mesures disponibles	27
2.6	Constat général sur la qualité de l'eau selon les mesures	28
3	METHODOLOGIE	29
3.1	Objectifs du modèle	29
3.2	Structure du modèle	29
3.2.1	Sources ponctuelles et diffuses	30
3.2.2	Voies d'apport considérées	30
3.2.3	Hypothèses de calcul, limitations du modèle	31
3.2.4	Apports en provenance de la France	33
3.3	Données utilisées dans le modèle	34

3.3.1	STEP – Eaux usées domestiques / Eaux usées industrielles	34
3.3.2	Surverses unitaires	37
3.3.3	Apports de sources diffuses	40
3.3.4	Apports en provenance de l'amont (France – Amont)	41
4	RESULTATS	42
4.1	Résultats par substance	42
4.1.1	Azote	43
4.1.2	Orthophosphates	43
4.1.3	Phosphore total	44
4.1.4	Carbone organique dissous	44
4.1.5	Chrome	45
4.1.6	Nickel	46
4.1.7	Plomb	46
4.1.8	Zinc	47
4.1.9	Cuivre	47
4.1.10	Acésulfame	48
4.1.11	Benzotriazole	48
4.1.12	Carbamazépine	49
4.1.13	Clarithromycine	49
4.1.14	Gabapentine	50
4.1.15	Metformine	50
4.2	Analyse et discussion	51
4.2.1	Interprétation générale	51
4.2.2	Validation du modèle	52
4.2.3	Evaluation des concentrations modélisées	55
4.2.4	Apports atmosphériques	56
5	CONCLUSIONS	57
6	BIBLIOGRAPHIE	58

Annexes

- Annexe 1 Carte du périmètre d'étude avec les stations de mesures « qualité », les stations hydrométriques et les STEP suisse présentes
- Annexe 2 Vue d'ensemble des mesures disponibles pour les différentes substances considérées par station et par année sur la période 2010-2014
- Annexe 3 Résultats de la campagne « screening micropolluants » (Eawag)
- Annexe 4 Comparaison entre les résultats de la campagne « screening micropolluants » de l'Eawag et ceux du laboratoire cantonal du Jura (Eawag)
- Annexe 5 Substances mesurées lors de la campagne « screening micropolluants » listée par concentrations et rapport avec les valeurs NQE (Eawag)
- Annexe 6 Analyses des données disponibles sur la période 2010 – 2014 pour les principales stations et substances
- Annexe 7 Détail des flux modélisés par substance et par source
- Annexe 8 Analyse et répartition des flux moyen de nutriments en provenance des STEP présentes dans le bassin versant suisse
- Annexe 9 Résultats du bilan de flux
- Annexe 10 Comparaison entre le flux modélisés et mesurés
- Annexe 11 Résultats des flux modélisés pour les substances sans flux amont (mesures non disponibles)
- Annexe 12 Résultats des flux modélisés pour les spéciations de l'azote

Abréviations et acronymes utilisés

AFU	Amt für Umwelt und Energie
BEP	Bassin d'eaux pluviales
Cd	Cadmium
CIPEL	Commission internationale pour la protection des eaux du Léman
COD	Demande Chimique en Oxygène
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
DCE	Directive cadre européenne sur l'eau
ENV	Office de l'Environnement (Jura)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
Hg	Mercurie
HYMOD	Modèle hydrologique
ISSKA	Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie
LC-OCD	Liquid Chromatography - Organic Carbon Detection
LOD	Seuil de détection
LOQ	Seuil de quantification
MODIFFUS	Modèle des flux de matières
N tot	Azote total
Ni	Nickel
N-NH4	Ammonium
N-NO2	Nitrite
N-NO3	Nitrate
NQE-MA	Critère de qualité en exposition chronique
NQE-MCA	Critère de qualité en exposition aiguë
OEaux	Ordonnance sur la protection des Eaux
OFEV	Office fédéral de l'Environnement
P tot	Phosphore total
Pb	Plomb
PCB	Polychlorobiphényles
PGEE	Plan Général d'Évacuation des Eaux
P-PO4	Orthophosphate
PsEaux	Plan sectoriel des Eaux (Canton du Jura)
SENE	Service de l'Énergie et de l'Environnement (Canton de Neuchâtel)
SIG	Système d'information géographique
STEP	Station d'Épuration des Eaux
STORM	Directive pour les rejets pluviaux urbains dans les eaux de surface (VSA)
Zn	Zinc

0 RÉSUMÉ

Objectif du modèle

- Prédire les flux de substances polluantes et de nutriments issues du territoire suisse arrivant dans le Doubs par source et substance, en fonction de l'occupation du territoire, en prenant en considération les principales sources d'apport ponctuelles et celles diffuses.
- Quantifier les contributions respectives des différents apports

Données de base, état actuel

Les études et suivis relatifs à la qualité de l'eau menés par les cantons de Neuchâtel et du Jura, de la France ainsi que de la Confédération permettent de dresser une situation globalement bonne, correspondant à un bassin versant moyennement à faiblement urbanisé avec une agriculture avant tout herbagère et peu de terres ouvertes. Les données de mesures de qualité sont également inventoriées pour la validation ultérieure du modèle de flux.

Modèle de flux

Le modèle est décomposé en 4 segments de cours d'eau ; en début de chaque segment (qui correspond à une station de mesure de débit), le flux du sous bassin versant correspondant est injecté. Le modèle inclut les nutriments (carbone, azote, phosphore), les métaux ainsi qu'une sélection de 17 micropolluants. Les sources ponctuelles considérées sont l'ensemble des STEP du bassin versant ainsi que les déversements d'eaux mixtes des deux principales agglomérations. La modélisation de ces flux s'appuie en grande partie sur des mesures en sortie des STEP. Les sources diffuses englobent les surfaces agricoles et d'agglomération, ainsi que les voies de circulation. Pour ces sources diffuses, deux modèles existants (modèle MODIFUSS et modèle développé sur mandat de OFEV, Strahm et al., 2013) sont combinés. Ils sont basés sur une analyse de l'occupation du sol.

Le modèle permet de prédire correctement les flux de polluants arrivant dans le Doubs, et il comprend les principaux flux, ce qui peut être validé en comparant les concentrations mesurées dans le milieu avec les concentrations simulées par le modèle.

Le modèle porte sur les substances contenues dans l'eau. La problématique des sédiments ou des algues n'est pas considérée dans le présent modèle. Le modèle est conservatif (pas d'autoépuration considérée) et considère des flux constants dans le temps (pas de dynamique temporelle considérée).

Résultats

Le modèle a permis de quantifier pour chaque substance et chaque segment les apports respectifs des STEP, des surfaces unitaires, de l'agriculture, des écoulements des surfaces bâties ainsi que des voies de circulation.

Sur la partie suisse, l'apport des substances et nutriments liés aux eaux usées provient majoritairement des 2 agglomérations neuchâteloises (Le Locle, La Chau-de-

Fonds), tandis que les apports d'origine agricole sont majoritairement issus du sous-bassin versant correspondant au dernier segment du modèle.

La charge amont française représente environ la moitié du flux en sortie de périmètre d'étude (sortie Ocourt), avec toutefois une variabilité en fonction du paramètre considéré.

Afin de dresser une image complète pour l'ensemble du bassin versant, il est nécessaire de d'établir un modèle similaire pour le territoire français du bassin versant.

Etude « Bilan de flux » : mise en perspective de l'Office fédéral de l'environnement

Les apports de substances sont modérés dans le Doubs. Une action globale est nécessaire pour améliorer durablement la qualité écologique du cours d'eau.

Le plan d'action national en faveur du Doubs vise à rétablir le bon fonctionnement des écosystèmes liés au Doubs frontalière et jurassien ainsi qu'à assurer la conservation durable de l'ensemble des espèces caractéristiques du Doubs et de ses affluents. L'un des axes d'action du plan national est la réduction des flux de pollution arrivant dans le Doubs, quelles que soient leurs origines.

Afin de pouvoir mieux préciser les mesures d'assainissement prioritaires en matière de qualité des eaux, l'OFEV a réalisé une étude « Bilan de flux » en provenance du bassin versant suisse du Doubs. L'étude a été terminée à fin 2015 (voir mesure 203 du Plan d'action national en faveur du Doubs et mesure A-CH du Plan d'action binational pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques du Doubs franco-suisse).

L'étude a consisté en une modélisation des flux de trois catégories principales de substances: les nutriments, les métaux lourds et les micropolluants. Toutes trois peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'état écologique du cours d'eau. Le modèle a permis de quantifier, pour chaque substance et chaque segment de la rivière, les apports respectifs des STEP, des surverses unitaires, de l'agriculture, des écoulements des surfaces bâties et des voies de circulation.

Les résultats du modèle ont été comparés aux concentrations mesurées lors de campagnes faites dans la rivière et correspondent à celles-ci dans les grandes lignes. Le modèle peut donc être considéré comme représentatif pour estimer les flux de substances.

Il ressort des résultats que les apports en azote total (indicateur pour les nutriments) de l'amont (territoire français du Haut-Doubs) sont du même ordre de grandeur que ceux générés dans le territoire du bassin versant suisse du Doubs. Pour les flux d'origine urbaine, les apports de substances proviennent en grande partie des agglomérations de La Chaux-de-Fonds et Le Locle. Les apports de nutriments proviennent majoritairement de l'agriculture.

Le bilan des flux de polluants indique que les apports de nutriments, de métaux lourds et de micropolluants sont en général faibles à modérés et qu'ils sont équivalents aux apports aboutissant dans des cours d'eau comparables du Plateau suisse. Les concentrations mesurées de micropolluants ne dépassent pas les critères écotoxicologiques de qualité. Le modèle développé ne permet cependant pas d'identifier des impacts localisés ou de courte durée. Les effets de mesures visant des pics de concentration de polluants ou nutriments liés particulièrement à des problèmes locaux ou ponctuels ne peuvent donc pas non plus être estimés avec le modèle développé.

En matière d'apports diffus d'éléments trace, provenant largement de produits phytosanitaires, la mise en œuvre du plan d'action sur les produits phytosanitaires actuellement en cours d'élaboration devrait permettre d'améliorer la situation.

L'ensemble des efforts déployés pour abaisser les apports de substances dans le Doubs doivent donc être poursuivis voire développés comme pour l'ensemble du réseau hydrologique suisse. Les résultats de l'étude confirment que l'amélioration durable de l'écosystème Doubs va résulter d'une action globale visant à réduire les impacts de la production d'hydroélectricité, à redonner un état plus naturel au cours d'eau et à améliorer la qualité de l'eau et des milieux aquatiques.

C'est en agissant dans ces trois domaines que la qualité écologique du Doubs pourra être améliorée durablement et que les espèces caractéristiques du Doubs – dont l'unique population d'apron vivant en Suisse – pourront être maintenues et développées et que ce site de grande valeur paysagère puisse demeurer vivant et attrayant pour les riverains du Doubs.

1 INTRODUCTION ET CADRE DU PROJET

1.1 Contexte général

Le Doubs, affluent de la Saône, est un cours d'eau s'écoulant dans le bassin versant du Rhône dont le cours inférieur et supérieur se situent en France mais dont la partie médiane, aussi appelé Doubs franco-suisse, se partage entre la Suisse et la France. Le Doubs franco-suisse possède une richesse piscicole ainsi qu'un cadre naturel et paysager de grand intérêt tout en étant le siège d'une importante activité de production hydroélectrique à cheval sur les deux pays.

Depuis plusieurs années, le Doubs et plus particulièrement la qualité de ses eaux est au centre de nombreuses préoccupations aussi bien dans les médias qu'au sein du grand public. Des épisodes de mortalité piscicole inquiétante ou de prolifération d'algues sont en effet régulièrement observés sans que ces derniers ne puissent être mis en relation avec une cause unique.

C'est dans ce contexte et afin de permettre une coordination franco-suisse efficace et pragmatique, qu'un groupe de travail binational pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques du Doubs franco-suisse a été mis sur place en 2011 sur la base de l'accord DCE du 11 février 2008. Le groupe de travail binational pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques du Doubs franco-suisse, dont l'objectif premier est « *d'affiner la connaissance et de définir un cadre général d'action mobilisant et fédérant les acteurs suisses et français* » s'est réuni pour la première fois le 12 mai 2011.

En janvier 2012, un document-cadre pour le Doubs franco-suisse a été validé par le groupe de travail binational afin que les autorités compétentes mettent en place un programme d'action dans le but de réduire les impacts des activités humaines sur la qualité du Doubs. Un tel plan d'action a ensuite été validé en janvier 2014 par le groupe de travail binational. Ce dernier veut agir sur divers axes afin de réduire les flux de pollution en provenance de différents secteurs (agriculture, industrie, réseaux d'assainissement, eaux usées,...). Des mesures visant à améliorer les connaissances actuelles des flux de polluants font aussi partie de ce plan d'action. La présente étude qui consiste en la modélisation des bilans de flux en provenance de la partie suisse du bassin versant du Doubs s'inscrit donc dans ce plan d'action. Il est à noter qu'un travail d'étude des flux de polluants en provenance du bassin versant français du Doubs est réalisé en parallèle du côté français.

1.2 Objectifs de l'étude

La présente étude traduit la volonté d'amélioration des connaissances des flux de polluants dans le Doubs, à savoir de :

- Mieux connaître les flux de polluants arrivant au Doubs et l'importance respective des différentes sources de polluants,
- Caractériser les flux de substances dans le Doubs en provenance du bassin versant suisse sur divers segments, par source et par substance,
- Valider les flux totaux estimés pour les différents segments avec les mesures disponibles de concentration dans le Doubs,
- Evaluer, par segment, l'envergure de la problématique de la pollution physico-chimique du Doubs issue de la partie suisse du bassin versant, par rapport à la charge totale mesurée dans le Doubs.

L'étude consiste en la modélisation des différents flux de polluants en provenance du bassin versant suisse du Doubs. Les données nécessaires à la réalisation de ce bilan de flux sont collectées et compilées puis les flux sont calculés pour une liste de différentes substances considérées. Les résultats du modèle sont ensuite validés par des mesures de concentration des différents polluants effectuées dans le Doubs.

1.3 Périmètre d'étude

La présente étude s'intéresse uniquement à la partie suisse du bassin versant du Doubs. Le périmètre d'étude a été défini par l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) sur la base des limites du bassin versant hydrogéologique déterminées par l'Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie (ISSKA) en 2014 (cahier des charges, OFEV, 2014). Celui-ci s'étend sur les cantons de Neuchâtel et du Jura ainsi que dans une moindre mesure sur le canton de Berne (Figure 1). La vue d'ensemble du périmètre d'étude est disponible en annexe (→ Annexe 1).

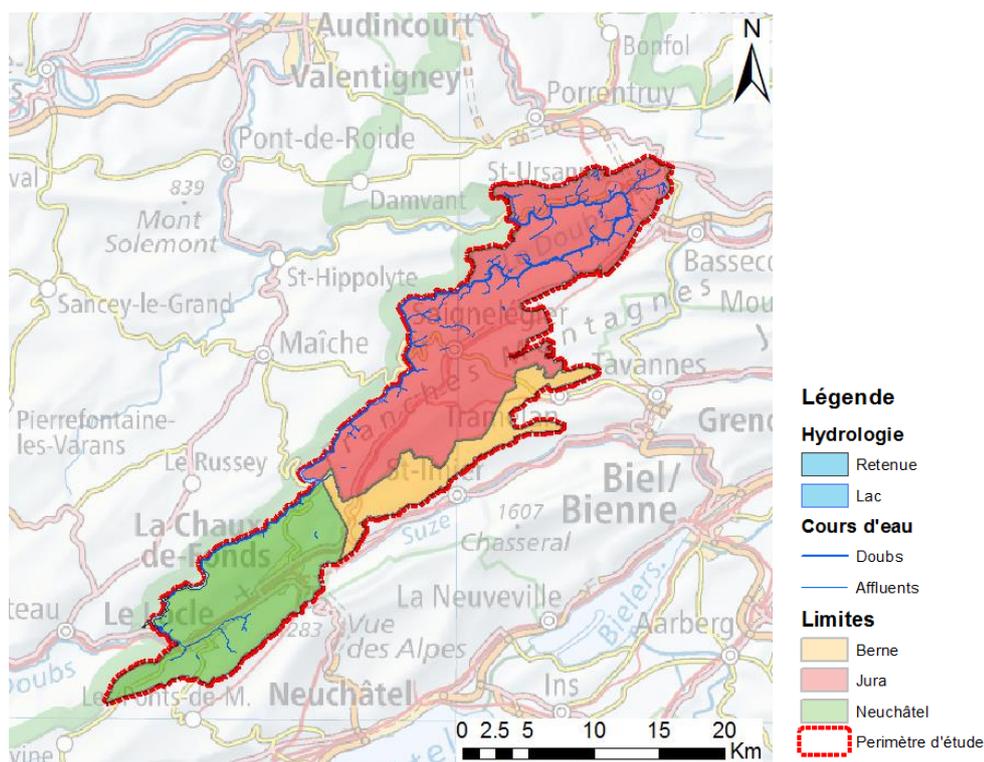


Figure 1 Périmètre d'étude (ligne rouge trait-tillée) avec les territoires cantonaux neuchâtelois (vert), jurassien (violet) et bernois (orange)

La portion du Doubs considérée dans cette étude est située entre le lac des Brenets (lac de Chaillexon) et Brémoucourt. Ce tronçon du Doubs mesure environ 70 km et comporte divers aménagements hydroélectriques (barrages et seuils). Les principaux aménagements se situent d'amont en aval à Le Châtelot, La Rasse, Le Refrain, La Goule, Le Theusseret, St-Ursanne, Bellefontaine et Ocourt. Le Tableau 1 résume les surfaces des différents cantons dans le périmètre d'étude ainsi que le nombre d'habitants estimés.

	Neuchâtel	Jura	Berne
Surface [km ²]	116	231	50
Habitants ¹	50'000	10'000	-

Tableau 1 Surfaces et nombre d'habitants estimés dans le périmètre d'étude pour les cantons de Neuchâtel, du Jura et de Berne

¹ Estimation (PsEaux, 2012)

1.4 Substances étudiées

Les polluants considérés dans cette étude et dont les flux sont modélisés se regroupent en trois catégories principales : les **nutriments**, les **métaux** et les **micropolluants**. Les nutriments et métaux (7 substances chacun) considérés dans le cadre de cette étude correspondent à la liste de substances à prendre en considération établie par l'OFEV (Point 3.1.2 du cahier des charges du 27.03.2014).

En ce qui concerne les micropolluants, **17 substances** couvrant un large spectre d'utilisation et représentatives des apports d'origine humaine en Suisse ont été sélectionnées sur la base de la littérature actuelle en la matière². Parmi les micropolluants considérés dans cette étude, l'*acésulfame* est un additif alimentaire, le *nonylphénol* et le benzotriazole sont des agents anticorrosion, le *diuron*, le *glyphosate*, l'*isoproturon*, le *MCPA*, le *métolachlore* et la *terbutryne* sont des produits phytosanitaires. Les autres micropolluants considérés sont tous des substances pharmaceutiques. Le Tableau 2 résume les substances étudiées dans la présente étude par catégorie.

Nutriments	Métaux	Micropolluants	
N-NH4 (Ammonium)	Cd (Cadmium)	Acésulfame	Isoproturon
N-NO2 (Nitrites)	Cr (Chrome)	Benzotriazole	MCPA
N-NO3 (Nitrates)	Cu (Cuivre)	Carbamazépine	Metformine
N tot (Azote total)	Hg (Mercure)	Carbamazépine-DI-OH	Métolachlore
P-PO4 (Orthophosphates)	Ni (Nickel)	Clarithromycine	Métoprolol
P tot (Phosphore total)	Pb (Plomb)	Diclofénac	Nonylphénol, iso-
COD (Carbone organique dissous)	Zn (Zinc)	Diuron	Sulfaméthoxazole
		Gabapentine	Terbutryne
		Glyphosate	

Tableau 2 Listes des substances considérées dans le cadre de l'étude par catégorie : nutriments, métaux et micropolluants

L'étude porte sur les substances contenues dans l'eau. Mis à part des éléments de synthèse d'études préexistantes (voir chapitre 2.1), aucune évaluation des substances contenues dans les sédiments ou la végétation aquatique n'a été menée.

² Voir bibliographie, partie „micropolluants“

2 ETAT DES LIEUX

2.1 Etudes existantes

Les principales études existantes pertinentes pour ce projet sont brièvement listées et synthétisées ci-après. Seule la partie de ces études relative à la problématique de la qualité physico-chimique du Doubs est présentée. **Ce qui suit ne constitue pas un résultat de la présente étude, mais résumé les conclusions d'études tierces.**

2.1.1 Observation nationale de la qualité des eaux de surface (NAWA)

Le réseau d'observation national NAWA³ compte 111 stations de mesures réparties dans toutes la Suisse et qui sont représentatives de la variété des cours d'eau du pays. Une de ces stations se situe à Ocourt, et intègre donc le bassin versant de la présente étude. Les paramètres de qualité (macropolluants) suivis par le réseau présentent (pour les données 2012) des classes de qualités «bonnes » à « très bonnes », sauf pour l'orthophosphate, classé « moyen ».

La caractérisation des bassins versant du réseau NAWA montre que le bassin versant du Doubs se caractérise par :

- Une urbanisation assez faible,
- Une agriculture peu intensive, avec seulement 1% des terres ouvertes ; l'essentiel des surfaces agricoles est composé de surfaces herbagères,
- Une proportion d'eau usée épurée moyenne de 6%, ce qui place le Doubs légèrement en dessous de la médiane des stations NAWA,
- Un part importante de surfaces boisées (41%).

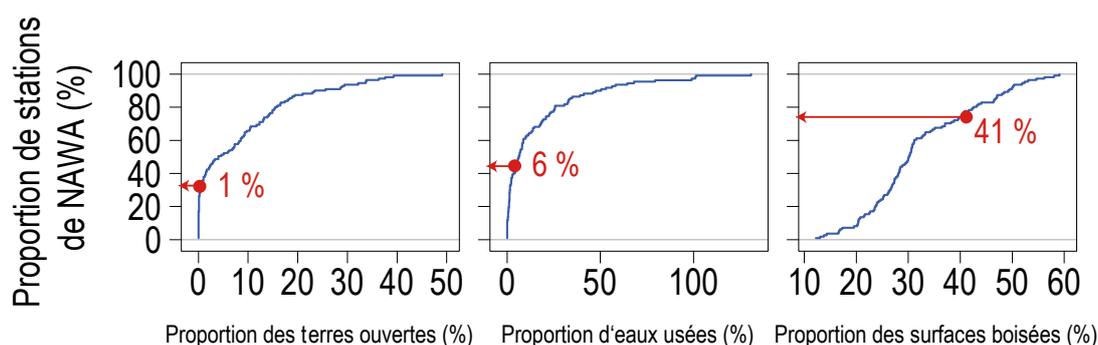


Figure 2 Situation du Doubs relative à l'occupation du sol, parmi les 111 stations du réseau NAWA (illustration OFEV, sur la base des données NAWA)

2.1.2 Projet intégré Doubs, Etat des lieux, diagnostic du bassin versant, 2011

Le projet intégré Doubs franco-suisse a pour objectif d'effectuer un état des lieux / diagnostic partagé sur le Doubs franco-suisse ainsi que ses affluents puis de définir un programme d'actions pour la restauration des milieux aquatiques, en concertation

³ www.bafu.admin.ch/nawa

avec tous les acteurs concernés. Les domaines traités lors de l'état de lieux concernent les principales caractéristiques du bassin versant, les usages liés à l'eau, la qualité des eaux superficielles ainsi que les biocénoses aquatiques. Dans le cadre du diagnostic, deux aspects sont abordés : la dégradation de la qualité de l'eau ainsi que la dégradation du fonctionnement physique de l'hydrosystème. Pour la partie du Doubs amont au tronçon franco-suisse (Haut Doubs), les concentrations mesurées à la station de Morteau sur la période 1990 – 2007 sont analysées, alors que pour le Doubs franco-suisse, les données de différentes sources (études, mesures de contrôle sur la période 2006 – 2010 pour le canton de Neuchâtel et sur la période 2004 – 2008 pour le canton du Jura) sont synthétisées. Cet état des lieux se résume comme suit (pour sa partie portant sur la qualité de l'eau) :

- **Nutriments** : Pour le Haut Doubs et le Doubs franco-suisse, une diminution des concentrations en matière organique et oxydable et phosphorée ainsi qu'une stagnation de relativement faibles concentrations en matière azotée est observée lors des 15 – 20 dernières années. Dans l'ensemble, les données analysées indiquent une qualité de l'eau dans l'ensemble « bonne » à « très bonne »⁴ avec des problématiques ponctuelles et localisées, principalement pour le phosphore et les orthophosphates. Certaines études défendent cependant l'idée que les concentrations en nutriments devraient être plus faibles encore pour correspondre à un cours d'eau à l'état naturel.
- **Métaux** : Bien que les données disponibles soient peu nombreuses et disparates géographiquement, des teneurs ponctuellement élevées en métaux lourds dans les sédiments et dans les algues ont été mesurées dans le haut Doubs à Morteau ainsi que dans le Doubs franco-suisse au niveau de St-Ursanne.
- **Micropolluants, HAP et PCB** : De teneurs significatives en micropolluants en provenance de l'industrie du traitement du bois et des pesticides ont été mesurés dans les sédiments de différents affluents du Doubs ainsi que dans certaines algues et bryophytes. Pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des contaminations des sédiments ainsi que des concentrations élevées ont été mesurées dans le Doubs à Goumois, St-Ursanne et dans divers affluents. Finalement pour les polychlorobiphényles (PCB), des traces ont été mesurées dans la retenue de Biaufond ainsi qu'au niveau de St-Ursanne. La représentativité de ces résultats est cependant fortement limitée par le très faible nombre de mesures effectuées.

En conclusion, il ressort de cette étude que pour les nutriments, la qualité de l'eau du Doubs est jugée dans l'ensemble « bonne » à « très bonne ». Une diminution des pollutions carbonées et phosphorées s'observe depuis les années 1990. Globalement, une amélioration de la qualité de l'eau de l'amont vers l'aval peut aussi être observée sur le tronçon franco-suisse. En revanche pour certains métaux et micropolluants, des concentrations parfois élevées sont mesurées dans les sédiments. L'interprétation des données disponibles reste cependant difficile au vu de la grande disparité géographique et de l'hétérogénéité de ces dernières.

⁴ Au sens du système modulaire gradué SMG de l'OFEV

2.1.3 Bassin du Doubs neuchâtelois, Diagnostic pluridisciplinaire, 2012

Suite aux mortalités piscicoles survenues depuis 2009, un diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface du bassin du Doubs neuchâtelois a été réalisé. Les objectifs de ce diagnostic sont de coordonner et d'assurer la cohérence des différentes campagnes de terrain effectuées en 2010 et 2011 sur le bassin du Doubs neuchâtelois, de rassembler, compiler et analyser les données existantes et de réaliser une étude pluridisciplinaire afin de permettre un diagnostic de l'état du Doubs et de ses affluents. Les principaux domaines traités dans cette étude sont l'hydrologie, la physico-chimie des eaux et de l'hydrobiologie. Pour évaluer la problématique de la physico-chimie des eaux, la méthodologie utilisée se base entre autres sur le système gradué, module «Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments» de l'OFEV. Les **résultats relatifs à la qualité des eaux établis dans cette étude** peuvent se résumer comme suit :

- **Nutriments** : Les données disponibles pour 5 stations sur le Doubs (Refrain, Pont Biaufond, La Rasse, Saut du Doubs et Clos Randot) ainsi que sur la Ronde et la Rançonnière sur la période 1993 – 2011 sont analysées. Globalement, une diminution des charges en nutriments est observée de l'amont à l'aval. Cette diminution est due à l'autoépuration et/ou la dilution qui se produit sur le tronçon étudié. Les apports des affluents que sont la Rançonnière et la Ronde impactent cependant parfois de manière non négligeable les concentrations mesurées.
- **Micropolluants** : Les mesures de pesticides effectuées entre 1998 et 2011 pour 5 stations sur le Doubs (Refrain, Pont Biaufond, La Rasse, Saut du Doubs et Clos Randot) ainsi que dans la Ronde et la Rançonnière sont analysées. Ces dernières ne semblent pas problématiques selon les auteurs de l'étude. En effet, sur l'ensemble des mesures, seules 4 (dont 2 sur la Rançonnière) dépassent le seuil de 100 ng/L de pesticides fixés par l'OEaux⁵ sur le tronçon évalué.

Il ressort de cette étude que les apports en nutriments d'origine anthropique sur le bassin versant neuchâtelois du Doubs peuvent être ponctuellement importants, en particulier pour ses principaux affluents que sont la Rançonnière et la Ronde. Malgré ces apports, la qualité de l'eau dans le Doubs reste globalement bonne.

⁵ Il est à noter que ce seuil n'est pas représentatif en termes d'écotoxicologie (voir rapport explicatif du 22.12.2014 relatif à l'OEaux, page 3). Dans la cadre de la présente étude, de critères d'évaluation ecotoxicologiques sont utilisés (voir plus loin, chapitre 4.2.3).

2.1.4 PsEaux, Module 33 : Cours d'eau - Doubs, BG, 2012

Dans le cadre de la réalisation du plan sectoriel des eaux (PsEaux) du canton du Jura, le *module 33 : Cours d'eau – Doubs* a pour objectif de dresser un état des lieux des déficits existants sur le Doubs et sur ses affluents dans le bassin versant jurassien, de définir des actions d'amélioration, ainsi que d'estimer le coût respectif et le degré de priorité de ces dernières. Le *module 33 : Cours d'eau – Doubs* traite de la problématique du Doubs et de ses affluents d'une manière globale en intégrant les thèmes de l'écomorphologie, de la qualité des eaux, du régime hydrologique, de l'hydrobiologie, de la nature, du paysage ou encore des activités de loisirs. En ce qui concerne la qualité des eaux, la méthodologie utilisée dans le cadre du PsEaux se base essentiellement sur le système modulaire gradué de l'OFEV. Cet état des lieux fournit les indications suivantes quant à la qualité de l'eau :

- **Nutriments** : Les données disponibles pour 8 stations situées le long du Doubs (Villers-le-Lac, Saut-du-Doubs, La Rasse, Biaufond, Refrain, Goumois, St-Ursanne et Ocourt) pour la période 2004 – 2008 sont analysées. La qualité de l'eau du Doubs en amont et sur sa partie jurassienne est qualifiée de bonne à très bonne avec une amélioration visible de la qualité de l'eau en direction de l'aval. Cette amélioration s'explique par les faibles apports polluants sur le tronçon jurassien du Doubs.
- **Métaux** : Pour les métaux dissous, les données disponibles pour les stations d'Ocourt, de St-Ursanne et de Goumois sont analysées. Ces dernières n'indiquent aucune concentration problématique au sens des limites prévues par l'annexe 2 de l'OEaux.
- **Micropolluants, pesticides, HAP et PCB**: Aucune mesure disponible pour les stations d'Ocourt, de St-Ursanne et de Goumois n'a permis de détecter de pesticides dissous. Certaines mesures ponctuelles de pesticides sur les algues indiquent quant à elles des concentrations détectables d'organochlorés. En revanche ni les PCB ni les HAP dissous n'ont été détectés sur l'ensemble des mesures disponibles pour les stations d'Ocourt, St-Ursanne et Goumois.

La principale critique effectuée dans le PsEaux, module 33 – Doubs au sujet de la qualité de l'eau concerne la trop faible résolution spatiale et temporelle des mesures disponibles afin de pouvoir évaluer d'éventuels déficits locaux et/ou temporels. Les données utilisées permettent toutefois de conclure qu'il n'existe pas de déficit majeur de la qualité de l'eau du Doubs. Un monitoring de la qualité des eaux dans le canton du Jura, coordonné avec les autorités neuchâteloises et françaises est dès lors recommandé afin d'augmenter la résolution spatiale et temporelle des mesures. Toutefois, plusieurs campagnes ont été réalisées dans l'intervalle et les données ont été prises en considération dans la présente étude.

2.1.5 Synthèse des études existantes

Quelques tendances générales peuvent être avancées sur la base des différentes études réalisées jusqu'à présent et mentionnées ci-avant, à savoir :

- **Qualité de l'eau du Doubs dans l'ensemble « bonne » avec certains points faibles** : D'après les données analysées dans le cadre de ces études, il ressort que la qualité de l'eau du Doubs franco-suisse est dans l'ensemble jugée « bonne » à « très bonne » pour les différents nutriments. Les concentrations de certains nutriments, en particulier le phosphore et les orthophosphates, peuvent cependant être localement et temporairement supérieures aux valeurs limites. Pour les métaux, des concentrations importantes sont localement mesurées dans les sédiments ainsi que dans les algues, mais les concentrations en métaux dissous restent quant à elles systématiquement inférieures aux limites.
- **Amélioration de la qualité de l'eau de l'amont vers l'aval** : Les différentes études réalisées ont permis de mettre en évidence une amélioration de la qualité de l'eau du Doubs de l'amont vers l'aval. Cette évolution s'explique par des apports en nutriments nettement plus faibles sur la partie aval du Doubs franco-suisse que sur sa partie amont (charge du Haut Doubs, apports de la Chaux-de-Fonds et du Locle) et par de plus grands débits en aval. La capacité « auto-épuration » du Doubs franco-suisse dans sa partie aval est aussi mentionnée.
- **Faible densité spatiale et temporaire et hétérogénéité des données disponibles** : Les différentes études réalisées soulignent toutes le manque de données disponibles afin d'évaluer de manière précise la qualité de l'eau, en particulier en ce qui concerne les micropolluants et les métaux.

Les différentes études mentionnées se basent sur les mesures disponibles au moment de leur rédaction respective. La présente étude se base quant à elle sur les mesures disponibles sur la période 2010 à 2013, voire 2014, lorsque disponibles.

2.2 Données préexistantes

2.2.1 Données de contrôle de la qualité des eaux

Les services cantonaux de l'environnement (SENE et ENV) ainsi que l'Agence de l'eau (France) prélèvent régulièrement des échantillons dans le Doubs afin d'évaluer la qualité physico-chimique de l'eau en différents endroits. Pour l'ensemble des stations, les paramètres physico-chimiques usuels sont mesurés périodiquement. Pour certaines stations et à intervalles moins fréquents, des mesures de métaux dissous sont aussi réalisées. En ce qui concerne les micropolluants, les mesures sont effectuées à des intervalles encore moins fréquents pour certaines stations ou lors de campagnes ponctuelles. Les stations de mesures situées dans le périmètre d'étude ou directement en amont de ce dernier sont d'amont en aval :

- **Morteau** (Agence de l'eau)

- **Clos Randot** (SENE)
- **Saut du Doubs** (SENE)
- **La Rasse** (SENE)
- **Biaufond** (SENE)
- **Refrain** (SENE)
- **Goumois** (Agence de l'eau)
- **St-Ursanne** (ENV)
- **Ocourt.** (ENV)

La Figure 3 illustre l'emplacement des différentes stations de mesures. La vue d'ensemble des mesures de polluants disponibles par station et par année sur la période 2010 – 2014 est disponible en Annexe (→ Annexe 2).

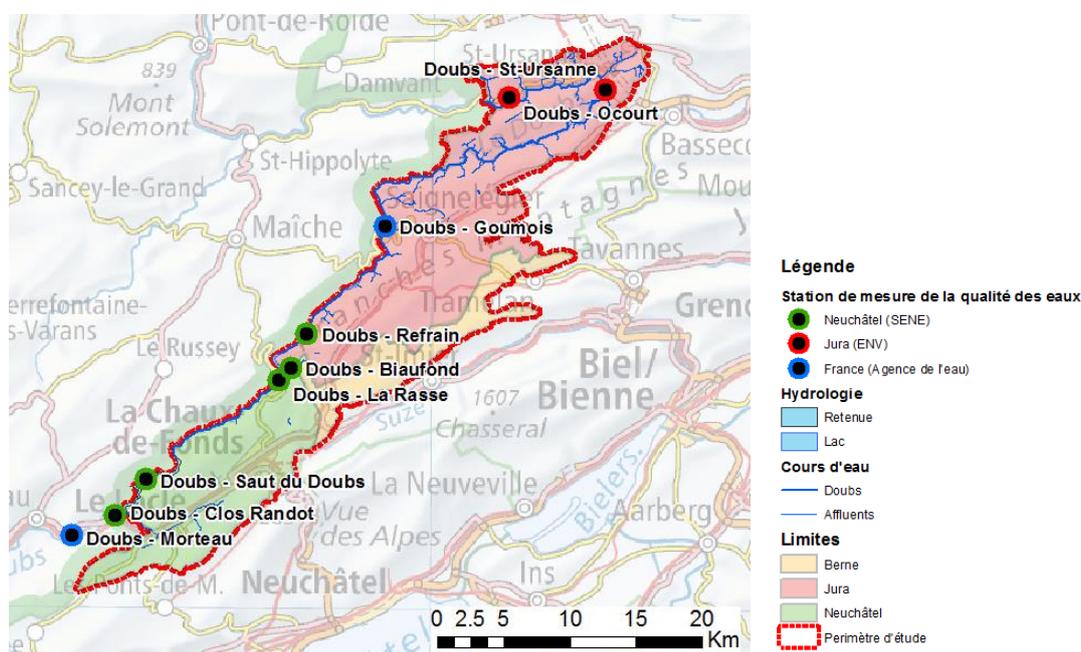


Figure 3 Emplacement des stations de mesure de la qualité des eaux du Doubs neuchâtelaises (vert), jurassiennes (rouge) et française (bleu) dans ou juste en amont du périmètre d'étude

2.2.2 Débits mesurés par les stations hydrométriques

Dans le périmètre d'étude, 4 stations hydrométriques de l'OFEV mesurant les débits du Doubs sont présentes :

- **Sortie du lac des Brenets – 2447**
- **Combe des Sarrasins – 2270**
- **Le Noirmont, La Goule – 2370**
- **Ocourt – 2210**

De plus, deux stations hydrométriques françaises situées à **La Rasse** et à **Goumois** sont présentes dans le périmètre d'étude. La Figure 4 résume l'emplacement des stations hydrométriques suisses et françaises présentes dans le périmètre d'étude.

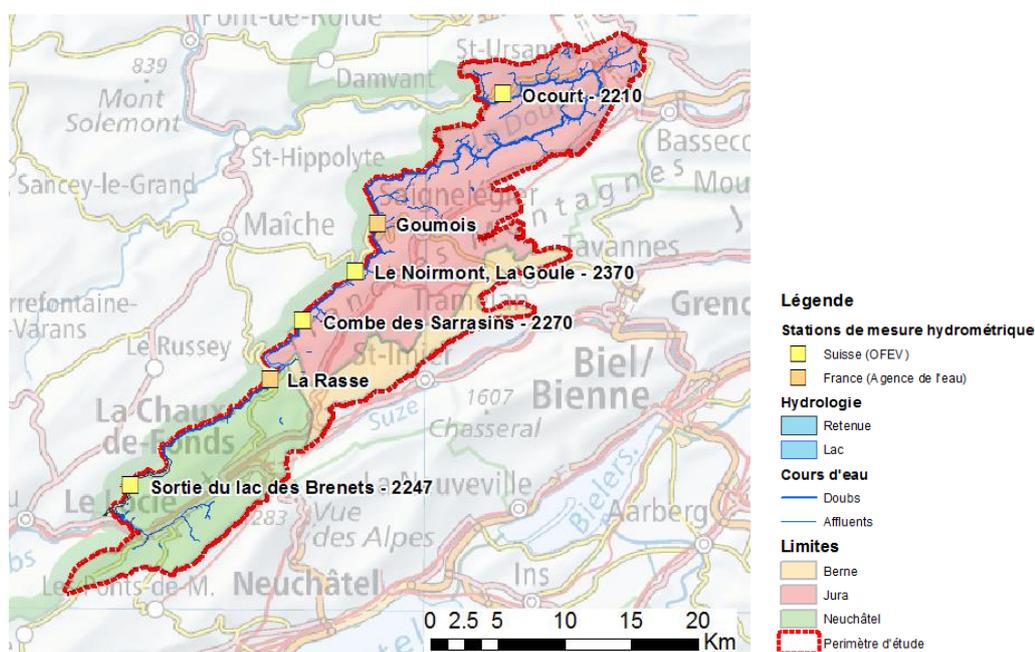


Figure 4 Emplacement des stations hydrométriques suisses (jaune) et française (orange) présentes dans le périmètre d'étude

Le Tableau 3 résume les débits moyens (Q_{moy}) et d'étiage (Q_{347}) pour les stations hydrométriques de l'OFEV sur la période 2003 – 2013.

Station hydrométrique	Q_{moy} (2003 – 2013) [m ³ /s]	Q_{347} (2003 – 2013) [m ³ /s]
Sortie du lac des Brenets – 2447	16.58	2.17
Combe des Sarrasins – 2270	24.79	5.53 ⁶
Le Noirmont, La Goule – 2370	24.50	4.19
Ocourt – 2210	30.41	5.52

Tableau 3 Débits moyens et d'étiage aux stations hydrométriques OFEV sur la période 2003 – 2013

Comme mentionné au chapitre 1.3, le tronçon du Doubs franco-suisse comprend divers aménagements hydroélectriques. Les retenues du Châtelot et du Refrain qui fonctionnent par éclusées impactent le régime hydrologique naturel du Doubs.

2.3 Données relevées dans le cadre de l'étude

2.3.1 Campagne de mesure « screening micropolluants »

Afin de compléter les données disponibles pour les micropolluants, une campagne de mesures « *screening micropolluants* » a été réalisée dans le cadre de la présente étude dans le but de cerner une très large gamme de micropolluants. Celle-ci a été effectuée par les services cantonaux de l'environnement des cantons du Jura (ENV)

⁶ La station de la Combe des Sarrasins tend à surestimer les faibles débits. Dans le modèle, le Q_{347} pour la Combe des Sarrasins a été fixé comme étant égal à celui de la Goule

et de Neuchâtel (SENE) en collaboration avec l'Eawag, l'Institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF, et s'est déroulée sur une période de 2 semaines, du 30 septembre au 14 octobre 2014 en 3 lieux :

- Clos Randot
- La Goule
- Ocourt.

A Clos Randot et La Goule, les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un échantillonneur mobile ISCO. La période de mesure a été définie d'entente avec les services cantonaux concernés dans le but de permettre la détection d'éventuels pesticides utilisés pour le traitement automnal des cultures. Durant la période de mesure, plusieurs épisodes pluvieux, dont certains importants, se sont produits (Figure 5). De telles précipitations étaient souhaitées afin permettre la détection de substances présentes dans les eaux de ruissellement, les eaux de drainage ou les eaux mixtes déversées.

L'échantillonnage peut être considéré comme représentatif pour les apports liés aux eaux usées. Pour les apports agricoles, les résultats sont à considérer avec prudence, la principale période d'application des produits phytosanitaires étant au printemps. Toutefois, au vu de la très faible intensité de l'agriculture dans le bassin versant (1% de terres ouvertes seulement), les sources agricoles sont considérées comme n'étant pas substantielles.



Figure 5 Photos de la campagne (Clos Randot) de « screening micropolluants » durant laquelle une forte montée du niveau du Doubs a pu être observée (source des images : SENE)

Les mélanges des échantillons prélevés sur 2 semaines (1 à 2L par échantillon) ont été envoyés à l'Eawag afin d'être stockés à - 20°C avant d'être analysés selon sa propre méthodologie d'analyse. Le rapport relatif aux résultats des analyses effectuées par l'Eawag est disponible en annexe (→ Annexe 3). En parallèle, les échantillons prélevés lors de la semaine du 07.10.2014 au 14.10.2014 ont été analysés par le laboratoire cantonal du Jura. Une comparaison a été effectuée entre les résultats des analyses Eawag et celles du laboratoire cantonal du Jura. La corrélation des résultats de ces deux analyses est bonne et ce en particulier au vu des périodes d'échantillonnages différentes (1 semaine pour les échantillons analysés par le laboratoire cantonal du Jura contre 2 semaines pour les échantillons analysés par l'Eawag). Le rapport de comparaison entre les résultats de ces deux analyses effectué par l'Eawag est disponible en annexe (→ Annexe 4). Pour la suite, seuls les résultats des analyses réalisées par l'Eawag seront présentés.

2.3.2 Analyse des résultats de la campagne « screening micropolluants »

Au total, 532 substances ont été analysées par l'Eawag. Parmi celles-ci, seules 95 sont présentes en une concentration supérieure au seuil de détection dans au moins un des échantillons analysés. Presque toutes les substances considérées dans la présente étude sont mesurées en des concentrations supérieures au seuil de quantification et généralement en des concentrations comparativement plus élevées que les autres substances (→ Annexe 5). Les 15 substances ayant les plus hautes concentrations mesurées sont toutes soit directement considérées dans le modèle soit possèdent un impact environnemental similaire et une voie d'apport identique à une autre substance modélisée. Par exemple, 4 édulcorants artificiels sont présents parmi les 15 plus hautes concentrations mesurées, alors que parmi ceux-ci, seule l'acésulfame, qui représente les plus hautes concentrations, est modélisée. Un autre exemple est celui de l'agent anticorrosion methylbenzotriazole qui se trouve parmi les 15 plus hautes concentrations mesurées mais qui n'est pas directement considéré dans le modèle. Celui-ci possède cependant des propriétés similaires et une voie d'apport identique au benzotriazole, substance quant à elle modélisée.

Les résultats du screening micropolluants effectué confirment donc le choix des substances considérées dans le modèle en tant que bons indicateurs des micropolluants émis sur le bassin versant suisse du Doubs (→ 1.4).

Les substances dont les concentrations mesurées lors du screening micropolluants sont les plus proches du critère de qualité en exposition chronique (NQE-MA) tel que défini par le centre Ecotox (→2.4.1) tout en restant très inférieures à cette limite, sont le diclofénac avec un rapport concentration/NQE-MA de 0.24 à Clos Randot et le Diuron avec un rapport concentration/NQE-MA de 0.15 à La Goule (→ Annexe 5). Toutes les autres substances sont mesurées en des concentrations d'un facteur au minimum 10 fois inférieur au critère NQE-MA.

2.3.2.1 Substances non considérée dans le modèle

Parmi les substances non considérées dans le modèle mais cependant mesurées dans des concentrations significatives par rapport aux limites NQE lors de la campagne micropolluants, se trouvent les substances suivantes :

- acide naphthalène-2-sulfonique (concentration de 790 ng/L mesurée à Ocourt)
- triethyl phosphate (concentration de 120 ng/L mesurée à Clos Randot)

Ces deux substances proviennent selon toute vraisemblance de sources industrielles et se sont retrouvées dans le Doubs après un passage par une STEP.

L'**acide naphthalène-2-sulfonique** est un intermédiaire produit lors de la production de colorants. Au vu de la forte concentration de cette substance mesurée à Ocourt mais sa concentration sous le seuil de quantification à La Goule, il est probable que sa présence dans le Doubs soit le résultat d'un apport industriel au travers d'une STEP communale (suisse ou française) située entre Saignelégier et Ocourt.

En ce qui concerne le **triethyl phosphate**, la plus haute concentration est mesurée à Clos Randot, avant de diminuer ensuite par effet de dilution. Cette substance est utilisée pour différentes applications mais principalement lors de la synthèse de cétones ainsi que dans l'industrie des matières plastiques en tant que catalyseur. Cette substance est également utilisée pour la fabrication de produits tels que l'acétate de cellulose, les polyuréthanes, les polyesters ou lors de la production de divers produits pharmaceutiques ou agrochimiques, lubrifiants et vernis ignifugeants, adoucissants, solvants ou encore en tant que support pour d'autres additifs. La forte concentration de triethyl phosphate mesurée à Clos Randot ainsi que sa nette diminution ensuite indique que l'apport de ce dernier dans le Doubs a probablement lieu en amont du périmètre d'étude.

2.3.2.2 Autres substances analysées lors de la campagne de mesure micropolluants

Les substances relatives **au traitement du bois** n'ont pas été analysées par l'Eawag mais l'ont été par le laboratoire cantonal du Jura⁷. Selon ces analyses, les concentrations mesurées pour ces substances sont **systematiquement inférieures aux seuils de quantification**⁸.

De même, aucune substance pouvant typiquement être associée à des écoulements en provenance de **sites pollués**⁹ n'a pu être détectée en concentrations anormales lors des analyses effectuées.

2.3.2.3 Comparaison au screening NAWA-SPEZ

La représentativité des mesures effectuées dans le Doubs peut être vérifiée à l'aide des mesures issues de la campagne NAWA-SPEZ de 2012. Un screening de micropolluants a été effectué dans ce cadre. La comparaison est pertinente pour les substances issues des eaux usées, sachant que 3 des 5 stations considérées présentent des taux d'eaux usées similaires dans le cours d'eau (moins de 10%). Par contre, la comparaison n'est pas pertinente pour les sources diffuses, en particulier l'agriculture, car les bassins versants considérés ne sont pas comparables à celui du Doubs.

On observe la bonne cohérence du screening effectué dans le Doubs avec les observations faites dans des cours d'eau comparables analyses dans le cadre du suivi NAWA-SPEZ :

⁷ Les substances analysées suivantes pourraient provenir de produits de traitement du bois : Chlorpyrifos, Cyperméthrine, Deltaméthrine, Pendiméthaline, Permethrine, Propiconazole

⁸ Ces seuils de quantification sont trop élevés par rapport à la toxicité des insecticides de la classe des pyréthroides. Une technique analytique spécifique plus sensible, qui ne peut être effectuée en routine à l'heure actuelle, devrait être utilisée pour ces substances.

⁹ Typiquement solvants chlorés, PCB, nonylphenol, chrome, bromides

Elément de comparaison	Screening Doubs	NAWA SPEZ ¹⁰
Nombre de substances analysées	532	300
Nombre de substances détectées (%)	95 (18%)	45 (15%)
Dont produits pharmaceutiques	59	32
Concentration médiane produits pharma.	20 ng/l	25 ng/l

Tableau 4 Comparaison des résultats du screening dans le Doubs avec les résultats du suivi NAWA-SPEZ (2012).

2.4 Analyse des données disponibles

Les données relatives à la qualité de l'eau disponibles sur la période 2010 – 2014 pour les stations situées en amont ainsi que sur le tronçon étudié ont été récoltées auprès des différents services concernés. La vue d'ensemble des données disponibles par station par année et par substance est disponible en annexe (→ Annexe 2).

2.4.1 Valeurs limites considérées pour l'évaluation de la qualité de l'eau

Pour les nutriments et les métaux sélectionnés dans le cadre de cette étude, les limites fixées dans l'Annexe 2 de l'OEaux sont utilisées afin d'évaluer la qualité des eaux du Doubs. En complément, pour les substances n'ayant aucune limite fixée dans l'OEaux, les objectifs chiffrés supplémentaires de l'OFEV selon le système modulaire gradué (SMG) sont utilisés. Le Tableau 5 résume les limites considérées pour les différents nutriments et le Tableau 6 celles pour les métaux dissous.

Nutriments	Limite OEaux Annexe 2 [mg/L]	Objectifs chiffrés OFEV, selon SMG [mg/L]
N-NH4 (Ammonium)	0.2 ¹¹	0.04 ¹²
N-NO2 (Nitrites)	-	0.02 ¹³
N-NO3 (Nitrates)	5.6 ¹⁴	1.5
Azote total	-	7
P-PO4 (Orthophosphates)	-	0.04
Phosphore total	-	0.07
COD (Carbone organique dissous)	4	2

Tableau 5 Concentrations limites fixées dans l'OEaux (Annexe 2) ou dans les objectifs chiffrés complémentaires de l'OFEV pour les différents nutriments considérés

¹⁰ 3 stations sur 5 du NAWA-SPEZ présentent des taux d'eaux usées similaires au Doubs à Ocourt (< 10%)

¹¹ Valeur la plus exigeante, applicable pour une température de l'eau supérieure à 10°C

¹² Valeur la plus exigeante, applicable pour une température de l'eau supérieure à 10°C

¹³ Valeur la plus exigeante, applicable pour des concentrations en Cl- inférieures à 10 mg/L

¹⁴ En principe, cette valeur est applicable aux cours d'eau servant pour l'alimentation potable

Métaux	Limite OEaux – Annexe 2 [µg/L]
Cd (Cadmium)	0.05
Cr (Chrome)	2
Cu (Cuivre)	2
Hg (Mercure)	0.01
Ni (Nickel)	5
Pb (Plomb)	1
Zn (Zinc)	5

Tableau 6 Concentrations limite fixées dans l'OEaux (Annexe 2) pour les différents métaux (en concentration dissoute) considérés

En ce qui concerne les micropolluants considérés dans le cadre de cette étude, il n'existe pour le moment aucune valeur limite dans l'OEaux. Le critère d'évaluation du risque relatif à une exposition chronique (NQE-MA) tel que proposé par le centre Ecotox est dès lors utilisé¹⁵. Afin d'évaluer adéquatement le risque potentiel représenté sur le long terme par les micropolluants présents dans le Doubs, les valeurs relatives à une exposition chronique (NQE-MA) sont préférées à celles relatives à une exposition aiguë (NQE-CMA). Le Tableau 7 résume les valeurs limites des critères NQE-MA et NQE-CMA pour les différents micropolluants considérés dans le cadre de cette étude.

Micropolluants	Critère de qualité exposition chronique NQE-MA [µg/L]	Critère de qualité exposition aiguë NQE-CMA [µg/L]
Acésulfame	-	-
Benzotriazole	30	120
Carbamazépine	0.5	2'550
Carbamazépine-DI-OH	- ¹⁶	- ¹⁰
Clarithromycine	0.06	0.11
Diclofénac	0.05	-
Diuron	0.02	0.06
Gabapentine	-	-
Glyphosate	108	300
Isoproturon	0.32	1.2
MCPA	1.34	15.2
Metformine	1'000	9'100
Métolachlore	0.69	2.3
Métoprolol	64	76
Nonylphénol, iso-	0.013	3.27
Sulfaméthoxazole	0.6	2.7
Terbutryne	0.065	0.34

Tableau 7 Concentrations limite selon les critères de qualité en exposition chronique (NQE-MA) et aiguë (NQE-CMA) pour les différents micropolluants considérés (centre Ecotox)

¹⁵ http://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/vorschlaege/index_FR

¹⁶ Critère non défini, « actuellement pas possible » d'après le centre Ecotox

2.4.2 Analyse sommaire des mesures de concentrations disponibles par substance

Les mesures disponibles aux stations de Morteau, Clos Randot, Saut du Doubs, Refrain, Goumois et Ocourt ainsi que les analyses réalisées lors de la campagne « screening micropolluants » effectuée dans le cadre de cette étude ont été analysées. Les graphiques des analyses des mesures disponibles par substance et par station sont présentés de manière détaillée en annexe (→ Annexe 6).

Pour les **composés azotés**, des dépassements des limites OEaux et des objectifs chiffrés complémentaires OFEV sont observés en amont du périmètre d'étude (N-NH₄ et N-NO₂). En revanche, sur le tronçon étudié, les concentrations sont systématiquement inférieures aux limites et objectifs fixés. Depuis mi-2014, l'ammonium est mesuré en continu à la station d'Ocourt. Aucun dépassement, même ponctuel, de la valeur limite n'a été observé.

Pour les **composés phosphorés** (P-PO₄ et P tot), des dépassements parfois notables de la limite au sens de l'annexe 2 OEaux et de l'objectif OFEV sont fréquemment observés tant en amont que sur le tronçon étudié. Un tel dépassement ne constitue toutefois pas un risque d'eutrophisation dans un cours d'eau. La valeur cible est déterminante pour les cours d'eau aboutissant aux lacs.

En ce qui concerne les **métaux dissous**, les concentrations mesurées sur le tronçon étudié sont généralement inférieures aux limites de l'OEaux, avec de nombreuses mesures se situant souvent sous le seuil de détection et de rares dépassements ponctuels. Pour le chrome et le cuivre, de plus nombreux dépassements des limites sont cependant observés.

Finalement, pour les **micropolluants** considérés, les concentrations mesurées sont systématiquement inférieures (plusieurs ordres de grandeur) aux critères d'exposition chronique (NQE-MA) définis par le centre Ecotox.

Les analyses sommaires des mesures de concentration disponibles par substance sont brièvement présentées ci-après.

Nutriments

- **N-NH₄** : En amont, dépassements parfois importants (jusqu'à 0.5 mg/L) de la limite OEaux. Sur le tronçon étudié, concentration systématiquement très inférieure à la limite avec une nette amélioration vers l'aval.
- **N-NO₂** : En amont, quelques dépassements parfois importants (> 0.04 mg/L) de l'objectif chiffré OFEV. Sur le tronçon étudié, concentration systématiquement en dessous de l'objectif avec une amélioration vers l'aval.
- **N-NO₃** : En amont et sur le tronçon étudié, concentration systématiquement très en dessous (<2.5 mg/L) de la limite OEaux. Pas de nette évolution d'amont en aval.
- **P-PO₄** : En amont et sur le tronçon étudié, concentration très fréquemment supérieures à l'objectif chiffré OFEV avec des dépassements parfois importants (> 0.07 mg/L). Pas de nette évolution d'amont en aval.
- **P tot** : En amont, concentration fréquemment supérieures à la limite OEaux

avec des dépassements parfois importants (> 0.25 mg/L). Sur le tronçon étudié, concentration généralement inférieure à la limite avec quelques dépassements. Légère amélioration d'amont en aval.

- **COD** : En amont et sur le tronçon étudié, concentration généralement inférieure à la limite OEaux mais proche de celle-ci avec quelques rares dépassements ponctuels. Légère amélioration d'amont en aval.

Métaux

- **Cr** : En amont, grande variabilité entre les mesures : nombreuses mesures sous le seuil de détection mais quelques dépassements parfois importants (> 0.005 mg/L Cr total) de la limite OEaux. Sur le tronçon étudié, concentration généralement inférieure à la limite avec de rares dépassements ponctuels observés à Ocourt.
- **Hg** : En amont et sur le tronçon étudié, concentration systématiquement inférieure au seuil de détection.
- **Ni** : En amont, grande variabilité entre les mesures : nombreuses mesures sous le seuil de détection mais aussi quelques dépassements parfois importants de la limite OEaux. Sur le tronçon étudié, concentration généralement inférieure à la limite avec de rares dépassements ponctuels observés à Ocourt.
- **Pb** : En amont et sur le tronçon étudié, concentration systématiquement très inférieure (<0.2 µg/L) à la limite OEaux et quasi systématiquement inférieure au seuil de détection.
- **Zn** : En amont, concentration généralement inférieure à la limite OEaux avec quelques rares dépassements ponctuels. Sur le tronçon étudié, concentration systématiquement très inférieures à la limite et nombreuses mesures sous le seuil de détection.
- **Cu** : En amont, concentration généralement inférieure à la limite OEaux avec quelques rares dépassements ponctuels. Sur le tronçon étudié, concentration systématiquement inférieures à la limite et quelques mesures sous le seuil de détection.
- **Cd** : En amont et sur le tronçon étudié, concentration systématiquement très inférieure (<0.015 µg/L) à la limite OEaux et quasi systématiquement inférieure au seuil de détection.

Micropolluants

- Pour l'ensemble des **micropolluants** considérés, les concentrations mesurées en amont ainsi que sur le tronçon étudié sont systématiquement très inférieures (plusieurs ordres de grandeur) au critère de qualité d'exposition chronique (NQE-MA) défini par le centre Ecotox. Dans la plupart des cas, toutes ou plusieurs mesures se situent même sous le seuil de détection.

2.4.3 Corrélation entre les concentrations et les débits mesurés

En amont du périmètre d'étude (Morteau et Clos Randot), il ressort des analyses que les concentrations en polluants les plus importantes sont généralement mesurées dans le Doubs lors de faibles débits (période d'étiage) et que celles-ci diminuent pour des débits plus importants (Figure 6, gauche). Hormis pour les polluants dont un apport important se produit lors d'épisodes pluvieux (ruissellement de surfaces bâties, lessivages des sols, déversements unitaires,...) une certaine corrélation entre de faibles débits et de hautes concentrations semble logique. Pourtant, cette corrélation ne s'observe généralement pas ou de manière très limitée dans le périmètre d'étude (Figure 6, droite).

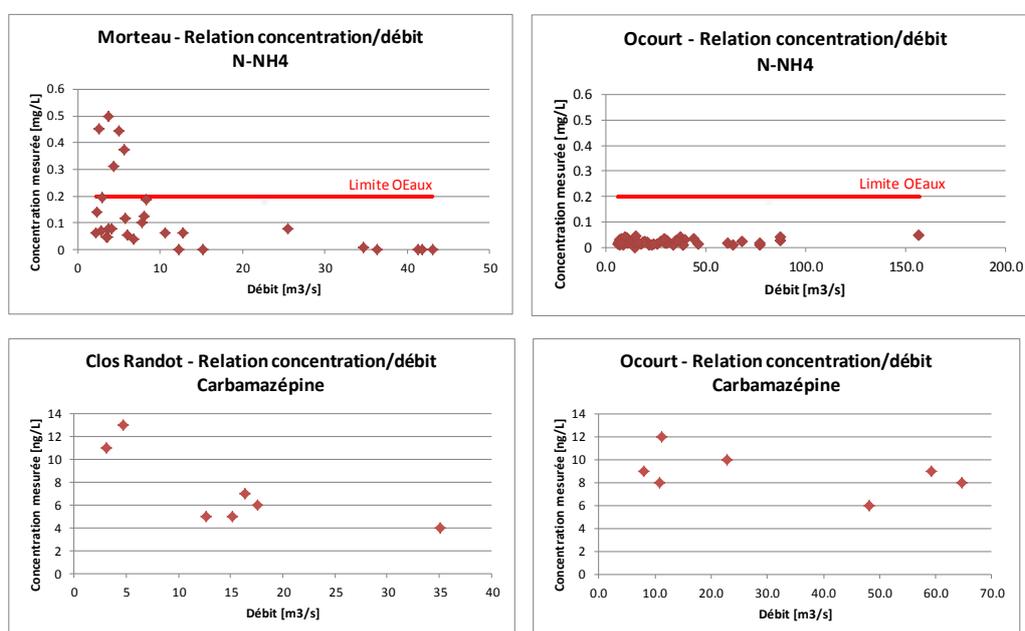


Figure 6 Relation entre les concentrations en ammonium (haut) et en carbamazépine (bas) et les débits mesurés dans le Doubs à Morteau (gauche) et à Ocourt (droite). A Morteau, les hautes concentrations sont généralement mesurées lors de faibles débits dans le Doubs alors qu'aucune corrélation ou une faible corrélation est observée à Ocourt

Une explication de ce phénomène peut provenir de la nature fortement influencée du régime hydrologique du Doubs sur le périmètre d'étude (→2.2.2). En effet, les éclusées induisent en aval des débits « artificiellement » élevés ou bas qui ne correspondent pas à des variations naturelles du Débit du Doubs. Par ailleurs un effet tampon et de mélange dans les différentes retenues et lacs peut aussi se produire.

2.5 Limitations liées à l'hétérogénéité des mesures disponibles

Le relativement faible nombre de données disponibles, surtout pour les métaux dissous et les micropolluants est un facteur important de limitation de l'analyse des données disponibles. Si l'analyse de ces dernières permet de se faire une bonne idée générale de la qualité du Doubs dans son ensemble, elle ne permet en aucun

cas une analyse exhaustive de potentiels problèmes locaux. En particulier, la forte hétérogénéité temporelle et géographique des mesures disponibles ne permet pas d'identifier des impacts localisés ou de courte durée (par exemple : un déversement d'eaux mixtes lors d'un débit d'étiage dans le Doubs, ou l'aval immédiat d'un rejet de STEP, avant mélange complet). Ces situations ne font pas partie de l'approche « bilan de flux » et doivent être traitées par le biais d'approches spécifiques (par exemple méthodologie STORM¹⁷ pour évaluer l'impact des rejets par temps de pluie).

2.6 Constat général sur la qualité de l'eau selon les mesures

De manière générale, il ressort de l'analyse des données disponibles sur la période 2010 – 2014 que la qualité de l'eau du Doubs sur le tronçon étudié peut dans l'ensemble être considérée comme étant *bonne à très bonne* par rapport aux limites de l'OEaux et des objectifs chiffrés de l'OFEV pour la plupart des nutriments et des métaux. Des dépassements ponctuels des valeurs limites existent cependant pour quelques nutriments, en particulier pour le phosphore et les orthophosphates. Pour ces deux derniers paramètres, les concentrations sont proches de la limite dans le périmètre d'étude. Pour les micropolluants, les substances considérées sont systématiquement présentes en concentration très inférieure aux limites. De manière générale, une amélioration de la situation de l'amont vers l'aval peut être observée pour différents polluants. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus lors des précédentes études (→0).

Il faut encore noter que le périmètre d'investigation de la présente étude se limite aux substances contenues dans l'eau (voir aussi chapitre 1.4). Les substances contenues dans les sédiments ou les algues n'ont pas été analysées et ne font pas partie du modèle de flux.

¹⁷ Rejets pluviaux urbains dans les eaux de surface (STORM), Directive pour la planification conceptuelle de mesures de protection, (VSA, 2007) ; ainsi que sa directive technique « Abwasserleitungen in Gewässer bei Regenwetter (STORM): Technische Richtlinie Band 1 und Band 2A », (VSA, 2013)

3 METHODOLOGIE

3.1 Objectifs du modèle

Si l'analyse des mesures de concentrations disponibles permet d'évaluer de manière générale la problématique de la qualité de l'eau du Doubs, celle-ci ne permet pas de déterminer les contributions respectives des différentes sources de polluants, ni d'estimer les concentrations dans le Doubs pour d'autres débits que ceux existants lors des mesures. La création d'un modèle de bilan de flux a pour objectif de permettre de répondre à ces questions.

3.2 Structure du modèle

Le modèle réalisé dans le cadre de cette étude permet de calculer les **flux de polluants dans le Doubs** en provenance du **bassin versant suisse** par addition de tous les intrants le long du tronçon considéré (voir chapitre 1.3). Les 4 stations hydrométriques de l'OFEV situées sur le Doubs dans le périmètre d'étude ont été choisies afin de délimiter 4 segments distincts (→2.2.2). Les débits mesurés aux stations hydrométriques [m³/s] permettent de passer de flux [kg/an] en concentrations dans le Doubs [mg/L] ou vice versa.

Point N°	Nom du point	Pays	Canton	Nature du point	Type de l'apport	Station OFEV N°	Q347 (2010-2013) [l/s]	Qmoy (2010-2013) [l/s]
1	Le Locle	CH	NE	Source ponctuelle	STEP + Surverse			
2	Les Brenets	CH	NE	Source ponctuelle	STEP			
3	Sortie du lac des Brenets	CH	NE	Station hydrométrique	Apports diffus	2247	2.29	16.41
4	Saut du Doubs	CH	NE	Station de mesure	-			
5	La Chaux-de-Fonds	CH	NE	Source ponctuelle	STEP + Surverse			
6	La Ferrière	CH	BE	Source ponctuelle	STEP			
7	Les Bois	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
9	Refrain	CH	JU	Station de mesure	-			
10	Combe des Sarrasins	CH	JU	Station hydrométrique	Apports diffus	2270	4.55	25.04
11	Les Breuleux	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
12	Le Noirmont	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
13	Le Noirmont, la Goule	CH	JU	Station hydrométrique	Apports diffus	2370	4.55	24.69
15	Saingnelégier	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
17	Goumois	CH	JU	Station de mesure	-			
19	Les Enfers	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
20	Montfaucon	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
21	Les Pommerats	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
22	Soubey	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
23	Epauvillers	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
24	Montmelon	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
25	St-Ursanne	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
27	Seleute	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
28	Ocourt	CH	JU	Source ponctuelle	STEP			
29	Doubs - Ocourt	CH	JU	Station hydrométrique + mesure	Apports diffus	2210	6.26	31.41

Figure 7 Représentation simplifiée de la structure du modèle de bilan de flux réalisé dans le cadre de cette étude avec les stations hydrométriques OFEV (rouge), les stations de mesures (gris) et les différentes sources considérées

3.2.1 Sources ponctuelles et diffuses

Les sources de polluants considérées dans le modèle de bilan de flux sont de deux sortes : ponctuelles ou diffuses.

Les **sources ponctuelles** représentent les apports en polluants géographiquement localisables que sont par exemple les rejets des stations d'épuration (STEP), les rejets d'eau industrielle ou encore les surverses unitaires des réseaux d'assainissement tels que des déversoirs d'orage. Les sources ponctuelles sont ajoutées au modèle individuellement et « linéairement » le long du Doubs en fonction de leur entrée connue ou estimée sur ce dernier (Figure 8, gauche).

En opposition aux sources ponctuelles, les **sources diffuses** correspondent aux apports de polluants en provenance de surfaces étendues et non ponctuelles comme par exemple les apports en provenance de l'agriculture, les écoulements des surfaces bâties ou encore les écoulements en provenance des routes ou des voies ferrées. Ces apports dépendent généralement de facteurs tels que l'utilisation du sol, la géologie ou la topographie. Les sources diffuses sont ajoutées dans le modèle au niveau des stations hydrométriques OFEV (Figure 8, droite). Les flux des sources diffuses correspondent donc aux apports provenant de la partie du périmètre située en amont de chaque station.

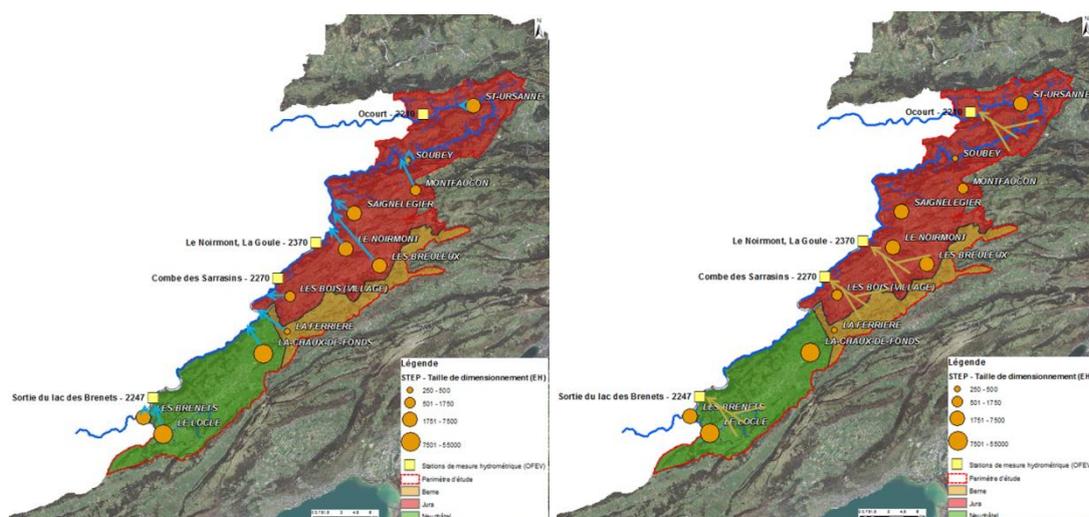


Figure 8 Représentation schématique des apports en provenance des sources ponctuelles (gauche, flèches bleues) et diffuses (droite, flèches brunes) dans le modèle

3.2.2 Voies d'apport considérées

Dans le cadre de cette étude, une sélection des sources de polluants à considérer pour le bassin versant suisse du Doubs a été réalisée d'entente avec l'OFEV sur la base des connaissances du bassin versant suisse et de ses principales sources ainsi qu'en fonction des données disponibles ou modélisables. Au final, les voies d'apports suivantes ont été considérées comme pertinentes et retenues dans le modèle:

- **STEP - Eaux usées domestiques et industrielles**
- **Surverses unitaires**
- **Agriculture**
- **Ecoulement de surfaces bâties**
- **Routes et voies ferrées**

A noter que les eaux usées industrielles ne sont considérées qu'au travers des STEP (pas d'apport direct d'eaux industrielles dans le Doubs). Des voies d'apport additionnelles telles que les **sites contaminés** ou l'**industrie du bois** n'ont dans un premier temps pas été jugées comme pertinentes pour le bassin versant suisse et n'ont donc pas été retenues dans le modèle. Ce choix a ensuite été validé par les résultats obtenus lors des campagnes de mesures micropolluants et en particulier lors du screening micropolluants effectué dans le cadre de cette étude (→ 2.3.2.2).

La Figure 9 résume le type de données utilisées dans le modèle de bilan de flux (valeurs mesurées, valeurs types, valeurs modélisées) par type de polluant et par source. Le récapitulatif détaillé des flux modélisés ou non par substance et par source est disponible en annexe (→ Annexe 7).

		Type de polluant		
		Nutriments	Métaux	Micropolluants
Source	STEPs - Eaux usées domestiques et industrielles	Débits mesurés et concentrations mesurées en sortie des STEP du périmètre d'étude	Débits mesurés en sortie de STEP Concentrations types ¹	Flux types par équivalent-habitant ²
	Surverses unitaires (p. ex. déversoirs)	Débits mesurés ou estimés et concentrations mesurées des eaux déversées	Inclus dans "STEP" et "surfaces bâties"	Inclus dans "STEP" et "surfaces bâties"
	Agriculture	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ³	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ⁴	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ⁴
	Ecoulement de surfaces bâties	Aucune émission considérée dans le modèle	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ⁴	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ⁴
	Routes / Voies ferrées	Aucune émission considérée dans le modèle	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ⁴	Facteurs d'émission selon utilisation du sol ⁴

Source ponctuelle
 Source diffuse

¹ AFU St. Gallen 2009, Strahm et al. 2013 ; ² Götz et al. 2010 (CIPEL) ; ³ MODIFFUS ; ⁴ Strahm et al. 2014 (OFEV)

Figure 9 Méthodes de détermination des flux utilisées dans le présent modèle par source et type de polluant avec distinction des sources ponctuelles et diffuses

3.2.3 Hypothèses de calcul, limitations du modèle

Le modèle établi dans le cadre de cette étude se veut simple et facile d'utilisation. Il a pour but premier de permettre d'identifier de manière grossière les flux de polluants en provenance de différentes sources pour les différents tronçons étudiés. Son but n'est pas la simulation précise des **concentrations** dans le Doubs.

Hypothèse de flux constants

Le modèle établi dans le cadre de cette étude se base sur l'hypothèse de flux de polluants constants ne variant pas au fil du temps. Le modèle « dilue » donc un flux *constant* (masse par unité de temps) dans un débit d'eau *variable* (litres par unité de temps) pour aboutir à une concentration modélisée dans le cours d'eau. Cependant, comme cela a été mentionné au chapitre 2.4.3, il s'avère sur la base des données de mesure que les flux de polluants sont en réalité assez fortement corrélés aux débits mesurés (Figure 10) : davantage de débit n'entraîne pas forcément une baisse des concentrations, ce qui signifie que le flux augmente avec le débit. Ceci résulte du régime hydrologique influencé par les éclusées : une augmentation de débit ne correspond pas toujours à une dilution du flux, puisque de l'eau stockée à l'amont et présentant une concentration donnée en polluant est relarguée.

Le modèle est ainsi fortement simplificateur par rapport à la réalité du fonctionnement hydrologique du Doubs. Ces considérations impliquent que la prédiction des concentrations dans le Doubs avec le modèle peut être incertaine selon le débit choisi, en particulier lors de crues. En même temps, la modélisation du flux global elle n'est pas entachée par cette particularité, puisque les quantités de polluants générés par les différentes sources ne sont pas touchées par ce phénomène.

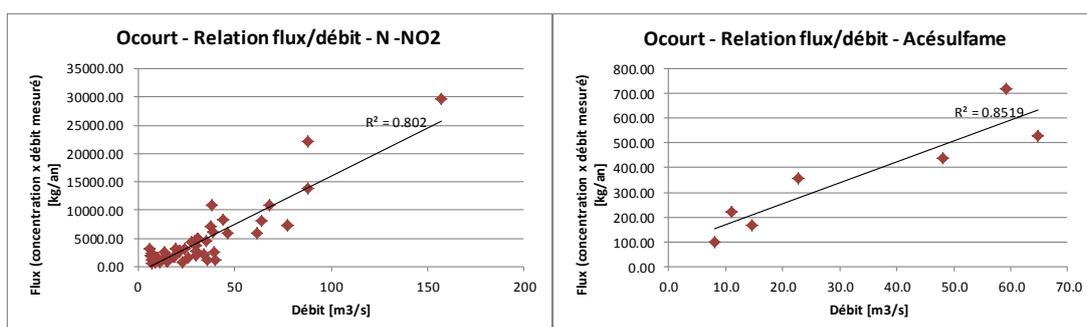


Figure 10 Corrélation entre les flux de nitrates et d'acésulfame et les débits mesurés à Ocourt

Hypothèse de conservation des polluants

Les processus de dégradation et d'assimilation des substances dans le milieu (par exemple accumulation dans les sédiments ou nitrification) ne sont pas considérés dans le modèle. Cette hypothèse est réaliste en ce qui concerne les micropolluants et dans une large mesure les métaux dissous. En revanche, ce n'est pas le cas pour certains nutriments et en particulier les composés azotés pour lesquels des processus de nitrification se produisent dans l'environnement. Le modèle est néanmoins réaliste pour le flux d'azote total (somme des spéciations).

Cette hypothèse place le modèle du côté pessimiste (surestimation des flux) pour l'ammonium et le nitrite, et sous-estime les nitrates. Toutefois, au vu des résultats et des comparaisons aux données mesurées, le modèle est adéquat pour simuler les flux de polluants dissous dans le Doubs.

Faible nombre de mesures disponibles

Finalement, il est important de noter que les résultats du modèle sont parfois basés sur un nombre restreint de mesures significatives (supérieures au seuil de détection ou de quantification).

3.2.4 Apports en provenance de la France

Les flux en provenance de la France en **amont du périmètre** d'étude (France – Amont) ne sont pas modélisés dans le cadre de cette étude. Afin de pouvoir évaluer cette charge amont, les flux sont obtenus en multipliant directement les mesures de concentration à Clos Randot (nutriments et micropolluants) ainsi qu'à Morteau (métaux) disponibles sur la période 2010 – 2014 avec les débits mesurés les jours correspondants à la station hydrométrique OFEV Sortie du lac des Brenets.

Les apports en provenance de la France **le long du périmètre d'étude** (France – Doubs frontière) ne sont pas l'objet de la présente étude. Les apports en provenance de l'assainissement du bassin versant français « frontière » sont constitués de quatre STEP françaises, à savoir Fournet-Blancheroche, Charmavillers, Goumois et Indevillers, représentent au total moins de 1800 habitants raccordés¹⁸. Les apports français en provenance de l'agriculture le long du périmètre d'étude sont quant à eux probablement proches de ceux en provenance de la partie jurassienne du bassin versant au vu des surfaces et de l'intensité agricole similaires¹⁹. Ces flux, relativement faibles par rapport aux totaux en jeu, seront donc « manquants » dans le modèle.

La Figure 11 illustre de manière schématique les deux types d'apports en provenance de la France et leur considération ou non dans le modèle de bilan de flux.

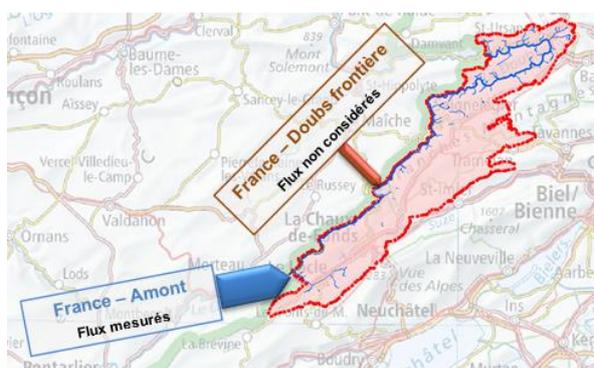


Figure 11 Représentation schématique des apports en provenance de la France de l'amont (bleu) et du bassin versant français du Doubs le long du périmètre d'étude (rouge)

¹⁸ Source : Projet intégré Doubs franco-suisse, Etat des lieux / diagnostic du bassin versant, 2011

¹⁹ Source : Projet intégré Doubs franco-suisse, Etat des lieux / diagnostic du bassin versant, 2011 et PsEaux, 2012

3.3 Données utilisées dans le modèle

3.3.1 STEP – Eaux usées domestiques / Eaux usées industrielles

Les 19 STEP suisses présentes dans le périmètre d'étude sont considérées dans le modèle de bilan de flux. Pour chacune d'entre elles, la valeur du flux en sortie de STEP a été distribuée entre les sources *STEP – Eaux usées domestiques* et *STEP – Eaux industrielles* sur la base des proportions d'eaux usées en provenance de l'industrie fournie par les services cantonaux (estimations).

Le Tableau 8 résume les principales caractéristiques des STEP présentes dans le périmètre d'étude.

Nom de la STEP	Canton	Habitants raccordés ²⁰	Q _{moy} STEP [m ³ /j] ²¹	Proportion industrie [%] ²²
Le Locle	NE	10'422	4'953	20
Les Brenets	NE	1'077	591	25
La Chaux-de-Fonds	NE	38'694	13'842	25
La Ferrière	BE	236	38	-
Les Bois	JU	624	138	10
Le Boéchet (Les Bois)	JU	95	19	0
Le Cerneux-Godat (Les Bois)	JU	95	19	0
Les Breuleux	JU	1'264	509	14
Le Noirmont	JU	1'336	521	20
Saignelégier	JU	1'819	707	30
Les Enfers	JU	83	17	0
Montfaucon	JU	309	134	50
Les Pommerats (Saignelégier)	JU	241	48	0
Soubey	JU	93	62	0
Epauvillers	JU	111	600	0
Montmelon	JU	70	30	0
St - Ursanne	JU	714	556	0
Seleute	JU	45	31	0
Ocourt	JU	91	18	0

Tableau 8 Principales caractéristiques des différentes STEP présentes dans le périmètre d'étude

²⁰ NE : situation fin 2013 (SENE) ; BE : situation fin 2014 (BVE) ; JU : valeurs les plus récentes estimées en prenant compte les résidents hors zone (ENV)

²¹ NE : moyenne des débits journaliers traités les jours de contrôle sur la période 2010 – 2013 (SENE) ; BE : moyenne des débits journaliers traités les jours de contrôle en 2014 (BVE) ; JU : valeurs fournies telles quelles par le service de l'environnement (ENV) sur la base des débits mesurés les jours de contrôle sur la période 2003 – 2014 (période variable selon les STEP)

²² NE: estimation basée sur les résultats du PGEE, le dimensionnement des STEP,... (SENE) ; BE : part industrielle non documentée (BVE) ; JU : estimation basée sur les mesures EH des STEP, population, analyses métaux,... (ENV)

Nutriments : Hormis pour les STEP jurassiennes pour lesquelles des valeurs de flux en sortie de STEP ont été fournies par le service cantonal de l'environnement (ENV), les flux de nutriments en sortie de STEP sont obtenus en multipliant les concentrations mesurées par les services cantonaux (mesures de contrôle sur 24h) avec les débits journaliers moyens traités les jours correspondants. Pour certains paramètres non mesurés dans certaines STEP, les flux en question sont estimés sur la base des flux disponibles pour les autres STEP. Les valeurs des flux tels que considérés dans le modèle de bilan de flux ont été validées par les services cantonaux concernés. Le Tableau 9 résume les données utilisées pour le calcul des différents flux des nutriments.

Nutriment	Données utilisées pour le calcul des flux en sortie de STEP
N-NH4	NE : concentrations et débits traités mesurés les jours de contrôle en sortie de STEP sur la période 2010 – 2013 (SENE)
N-NO2	BE : concentrations et débits traités mesurés les jours de contrôle en sortie de STEP en 2014 (BVE)
N-NO3	JU : valeurs fournies telles quelles par le service de l'environnement sur la base des mesures de contrôle disponibles sur la période 2003 – 2014 (période de référence variable selon les STEP) y compris parfois vérification à l'aide des données d'autocontrôle (ENV)
P tot	
N tot	NE, BE, JU : paramètre non mesuré. Estimation selon l'hypothèse: $N \text{ tot} = \sum N\text{-NH}_4 + N\text{-NO}_2 + N\text{-NO}_3$
P-PO4	NE : concentration mesurée et débit traité les jours de contrôle en sortie de STEP sur la période 2010 – 2013 (SENE) BE, JU : paramètre non mesuré. Estimation sur la base du flux moyen par habitant des STEP neuchâteloises
COD	NE : concentrations et débits traités mesurés les jours de contrôle en sortie de STEP sur la période 2010 – 2013 (SENE) BE : paramètre non mesuré. Estimation sur la base du flux moyen par habitant des STEP neuchâteloises et jurassiennes JU : valeurs fournies telles quelles par le service de l'environnement sur la base des mesures de contrôle disponibles sur la période 2003 – 2014 (période de référence variable selon les STEP) y compris parfois vérification à l'aide des données d'autocontrôle (ENV)

Tableau 9 Données utilisées pour le calcul des flux de nutriments dans le modèle par nutriment et par canton

Les valeurs des différents flux de nutriments en sortie des STEP tels que considérés dans le modèle sont disponibles en annexe (→ Annexe 8).

Métaux : Vu le très faible nombre de mesures de concentration de métaux en sortie de STEP disponibles (une seule mesure ponctuelle pour les STEP du canton du Jura en 2012, aucune mesure pour les STEP des cantons de Neuchâtel et de Berne), les flux ont été obtenus en multipliant des valeurs moyennes types de concentrations de métaux en sortie de STEP [$\mu\text{g/L}$] avec les débits annuels traités [m^3/an]. Le Tableau 10 résume les concentrations moyennes types en sortie de STEP considérés dans le modèle pour les différents métaux. Ces concentrations types sont quelque peu inférieures aux concentrations mesurées (Jura) pour certains métaux, ce qui peut s'expliquer par les activités industrielles des bassins versants en question. Toutefois, les données mesu-

rées sont trop peu nombreuses et ne permettent pas une généralisation sur l'ensemble de la région modélisée.

Métal considéré	Concentration type en sortie de STEP [µg/L] ²³
Cr (Chrome)	0.5
Hg (Mercure)	0.01
Ni (Nickel)	3.0
Pb (Plomb)	0.2
Zn (Zinc)	35
Cu (Cuivre)	10
Cd (Cadmium)	0.025

Tableau 10 Concentrations types des métaux en sortie de STEP telles que considérées dans le modèle

Micropolluants : Des valeurs moyennes de flux types par habitant et par substance (issues des vastes études menées par la CIPEL) ont été utilisées et multipliées par le nombre d'habitants raccordés pour les différentes STEP²⁴. Le Tableau 11 résume les flux types par habitant pour les micropolluants étudiés.

Micropolluant considéré	Flux type en sortie de STEP [µg/hab/j] ²⁵
Acésulfame	10'328
Benzotriazole	3'230
Carbamazépine	136
Carbamazépine-DI-OH	514
Clarithromycine	121
Diclofénac	289
Gabapentine	878
Métformine	7'695
Métoprolol	132
Nonylphenol, iso-	181
Sulfaméthoxazole	117

Tableau 11 Flux types par habitant des micropolluants en sortie de STEP tels que considérées dans le modèle (CIPEL, 2013)

Le canton du Jura a procédé à des mesures de micropolluants en sortie de STEP (entre 3 et 4 mesures pour chaque STEP, entre 2011 et 2014). S'agissant en partie de stations de petite taille (de l'ordre de quelques centaines d'habitants), la variabilité des concentrations mesurées est très élevée. Toutefois et globalement, les concentrations observées sont cohérentes avec les données figurant dans le tableau ci-dessus. Les concentrations mesurées ont tendance à être inférieures aux valeurs du

²³ AFU St. Gallen, 2009 ; Strahm et al., 2013 (données non publiées)

²⁴ Les mesures ponctuelles (2011, 2012, 2013) de micropolluants en sortie des STEP du périmètre d'étude confirment les valeurs CIPEL utilisées dans le modèle.

²⁵ Götz et al. 2013, Modélisation du flux de micropolluants provenant des eaux usées – Bassins du Léman et du Rhône aval, CIPEL

tableau. Par souci de cohérence avec le reste du bassin versant et au vu de l'échantillon faible disponible, ces mesures ne sont pas utilisées dans le modèle. A titre d'exemple, les flux observés (concentrations mesurées multipliés par les débits journaliers mesurés dans les STEP) sont comparés aux valeurs utilisées dans le modèle, pour le benzotriazole et le diclofenac :

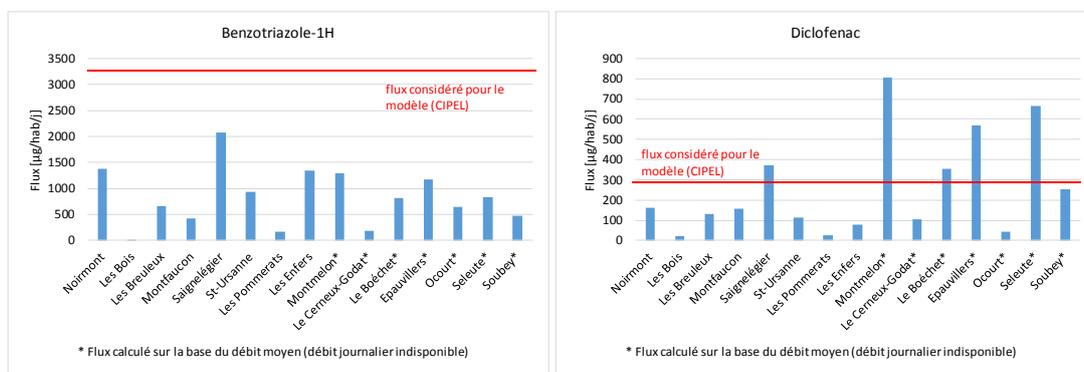


Figure 12 Flux mesurés dans les eaux usées épurées des STEP du canton du Jura (moyennes des mesures disponibles, 2011-2014), comparés au flux utilisé dans le modèle, pour le benzotriazole et la diclofenac.

3.3.2 Surverses unitaires

Seules les deux plus importantes surverses unitaires dans le périmètre d'étude, situées respectivement en amont des STEP du Locle et de la Chaux-de-Fonds ont été considérées dans le modèle. Au vu de la taille comparativement beaucoup plus faible des autres localités présentes, d'autres surverses unitaires éventuellement présentes dans le périmètre d'étude ont été jugées comme étant négligeables. De plus, le manque de données relatives à ces dernières ne permet pas une évaluation suffisamment précise. Le Tableau 12 résume les débits annuels moyens déversés des surverses considérées.

Surverse unitaire	Canton	Q annuel moyen déversé [m ³ /an]	Q annuel moyen traité [m ³ /an]
Le Locle	NE	3'000'000	2'000'000
La Chaux-de-Fonds	NE	2'000'000	4'700'000

Tableau 12 Valeurs approximatives des déversements pour les surverses unitaires considérées dans le modèle

Le Locle

Les débits en provenance du réseau d'assainissement et qui ne peuvent pas être traités par la STEP du Locle passent au travers d'un ACTIFLO[®] mis en service en 2011 puis sont ensuite rejetés dans le Bief du Locle. L'ACTIFLO[®] consiste en un traitement par coagulation – floculation avec ajout de micro sable suivi d'un décanteur lamellaire. Au vu du procédé physico-chimique de l'ACTIFLO[®], il a été considéré dans le cadre de cette étude que le passage au travers de celui-ci résulte en un abattement du phosphore (P-tot et PO₄) sans influence sur les autres polluants considérés (composés azotés, métaux dissous, micropolluants).

D'après le plan général d'évacuation des eaux (PGEE), les volumes annuels déversés en amont de la STEP du Locle et après dégrillage primaire sont de 3'140'000 m³/an (Ribi, 1996). Cette valeur est cohérente avec les 2'948'105 m³ qui ont été traités par l'ACTIFLO® en 2014²⁶. Une valeur de 3'000'000 m³/an a été considérée dans le modèle pour la surverse unitaire du Locle.

La Chaux-de-Fonds

Les eaux usées et pluviales en provenance du réseau d'assainissement de la Chaux-de-Fonds sont récupérées à l'aide de trois collecteurs principaux qui se rejoignent ensuite dans une grande galerie souterraine qui continue en direction de la STEP. Une vanne limite le débit à l'entrée de la STEP à 0.55 m³/s. Les débits supérieurs à cette limite et inférieurs à 2m³/s sont alors repris dans un bassin d'eaux pluviales (BEP) d'un volume de 2'000 m³. Les débits supérieurs à 2m³/s ou le trop plein du BEP lorsque celui-ci est plein finissent à la Ronde. Bien qu'un dégrillage grossier soit effectué en sortie du BEP, il a été considéré que celui-ci n'impacte aucunement les polluants considérés dans le cadre de la présente étude.

Les débits annuels déversés dans la Ronde sans traitement par la STEP ont été évalués lors d'une simulation des débits réalisée sur la période 1981 – 1990 (BG, 1998). Il ressort de cette dernière que le volume moyen annuel déversé directement ou après passage par le BEP est d'environ 2'000'000 m³ (Figure 13). C'est cette valeur qui a été reprise dans le modèle.

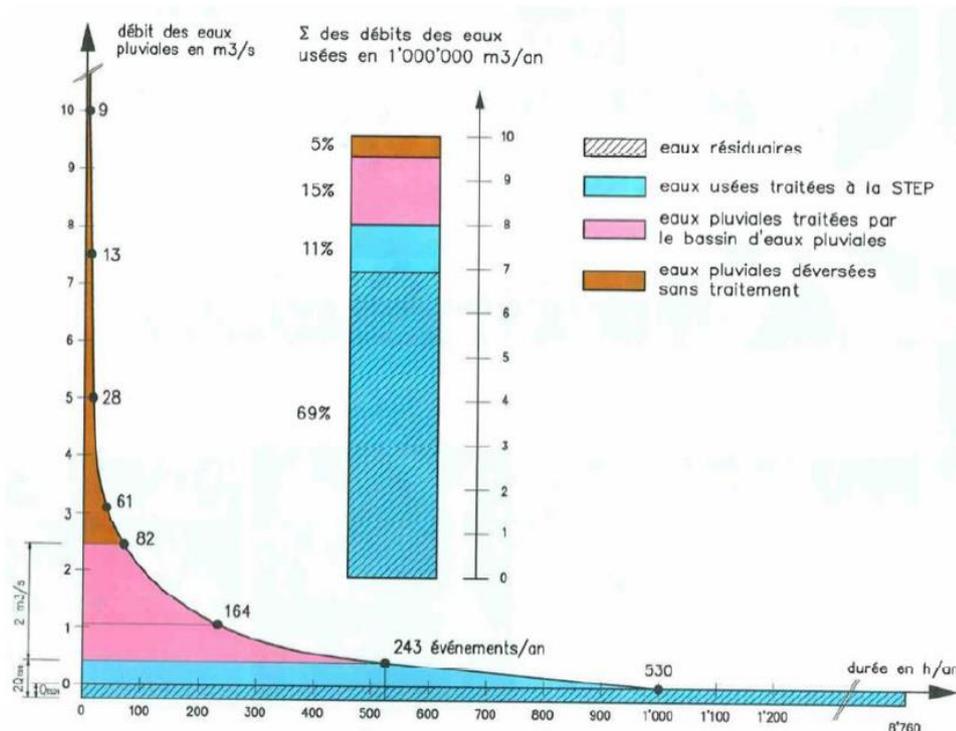


Figure 13 Débits, nombre et durée des événements de déversement annuels simulés sur la période 1981 – 1990 (Source : BG, 1998)

²⁶ Moyenne des débits traités par l'ACTIFLO® sur la période janvier – octobre 2014 (SENE)

Nutriments : Idéalement, les flux de polluants en provenance des surverses unitaires sont calculés en multipliant les concentrations les jours de déversements par les volumes déversés. Dans le cas de la présente étude, des mesures de concentrations les jours de déversements étaient disponibles pour l'ensemble de paramètres considérés uniquement pour la Chaux-de-Fonds. Pour le Locle, des concentrations en phosphore (P-tot et PO₄) en sortie de l'ACTIFLO® sont disponibles et ont été utilisées. Pour, les autres nutriments, les valeurs de la Chaux-de-Fonds ont été utilisées. Le Tableau 13 résume les concentrations considérées pour les différents nutriments pour les deux surverses ainsi que des valeurs types de la littérature.

Nom de la surverse	Concentration moyenne des eaux déversées [mg/L]						
	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	N tot	P-PO ₄	P tot	COD
Le Locle	4.22 ²⁷	0.34 ²²	2.70 ²²	7.56 ²²	0.25 ²⁸	0.57 ²³	7.92 ²²
La Chaux-de-Fonds	4.22 ²⁹	0.34 ²⁴	2.70 ²⁴	7.56 ²⁴	1.86 ²⁴	2.00 ²⁴	7.92 ²⁴
Valeurs types (Chocat et al.)	6	-	-	8.3	-	10	-

Tableau 13 Concentrations mesurées ou types des nutriments dans les eaux déversées telles que considérées dans le modèle

Métaux : Les flux de métaux dissous en provenance des surverses unitaires ne sont pas considérés de manière spécifique dans cette étude. Pour les flux d'origine diffuse, ceux liés à l'agriculture ne passent pas par les surverses unitaires alors que les flux liés aux écoulements de surfaces bâties et aux routes et voies ferrées sont estimés à l'aide d'un modèle basé sur l'occupation du sol³⁰ sans distinction de la part passant par les surverses unitaires. Finalement, les flux de métaux d'origine domestique ou industrielle sont alors déjà considérés au travers des apports des STEP. Etant donné les comparativement très faibles volumes d'eaux usées déversés en rapport à ceux traités par les STEP et au vu des relativement faibles taux d'abattement des métaux dans les STEP, la part supplémentaire des flux de d'origine domestique ou industrielle se retrouvant dans l'environnement au travers des surverses unitaires a été considérée comme étant négligeable dans le cadre de cette étude.

Micropolluants : Les flux de micropolluants en provenance des surverses unitaires ne sont pas considérés de manière spécifique dans cette étude. Ces derniers sont soit d'origine agricole (pesticides,...) et ne passent pas par les surverses unitaires soit sont d'origine domestique ou industrielle et sont alors déjà considérés au travers des apports des STEP en fonction du nombre d'habitants raccordés. Etant donné les comparativement très faibles volumes d'eaux usées déversés en rapport à ceux traités par les STEP et au vu des faibles taux d'abattement des micropolluants dans

²⁷ Moyenne des concentrations mesurées en entrée de la STEP de la Chaux-de-Fonds les jours de déversement (voir note 24 ci-après).

²⁸ Moyenne des concentrations mesurées en sortie de l'ACTIFLO® sur la période du 01.09.2014 au 18.11.2014, 34 valeurs (SENE).

²⁹ Moyenne des concentrations mesurées en entrée de la STEP de la Chaux-de-Fonds lorsque disponibles lors des principaux jours de déversement en 2013 Jours considérés : 30.01, 02.02, 05.02, 27.04, 10.06, 03.07, 29.07, 18.09, 23.10, 06.11 et 19.12 (données de contrôle de l'exploitant).

³⁰ Modèle OFEV pour l'apport de micropolluants de source diffuse, cf. chapitre suivant

les STEP, la part supplémentaire des flux de micropolluants d'origine domestique ou industrielle se retrouvant dans l'environnement au travers des surverses unitaires a été considérée comme étant négligeable dans le cadre de cette étude.

3.3.3 Apports de sources diffuses

Les apports diffus de nutriments, métaux et micropolluants considérés dans le modèle sont calculés à l'aide de modèles SIG (système d'information géographique) prenant en compte différentes couches d'occupation du sol afin de calculer les émissions relatives aux différentes sources considérées.

3.3.3.1 MODIFFUS

Les apports diffus de **nutriments** sont calculés à l'aide du modèle MODIFFUS, un modèle à large échelle permettant d'estimer les apports de polluants diffus dans les cours d'eau. Le modèle MODIFFUS permet de calculer les flux d'azote et de phosphore en provenance de sources diffuses (écoulements de surface, érosion, lessivage) dans les cours d'eau. MODIFFUS a initialement été développé à l'Agroscope de Reckenholz Täniken avant d'être amélioré et complété en 2014 dans le cadre de divers projets sur mandat de l'OFEV (Prasuhn & Hürdler, 2014).

Il s'agit d'un modèle statistique-empirique, qui est basé sur de nombreuses informations spatiales relatives à la couverture du sol et l'utilisation du territoire. Sur la base de mesures de terrain, de recherches de littérature et d'évaluations d'experts, les flux de substances sont quantifiés. Les flux d'azote total, de phosphore total et de carbone organique dissous sont modélisés à l'aide de MODIFFUS. Les différentes spéciations (ammonium, nitrate, nitrite) ne peuvent cependant pas être modélisées³¹. Les apports en nutriments sont calculés uniquement pour les sources agricoles. Aucun apport en nutriments n'a été considéré pour les sources "Ecoulement de surfaces bâties" et "Routes / Voies ferrées".

3.3.3.2 Modèle OFEV pour l'apport de micropolluants de source diffuse

Les apports en **micropolluants organiques** et en **métaux** ont été déterminés sur la base d'un modèle d'information géographique (SIG) de l'OFEV. Ce modèle est lui aussi basé sur une analyse spatiale basée sur un outil d'information géographique (SIG). En fonction de différents types d'occupation du sol associés à des productions génériques de substances, un flux entrant dans le système aquatique peut être modélisé. En particulier, ce modèle comporte une modélisation des apports en pesticides. Dans le présent modèle de flux pour le Doubs, les sources "agriculture", "écoulement de surfaces bâties" ainsi que "routes/voies ferrées" ont été retenues.

Le réseau hydrographique du modèle se base sur le réseau du vecteur 25 et englobe quelque 64'000 km de linéaire de cours d'eau, décomposé en 182'000 tronçons. Pour chaque tronçon, un bassin versant correspondant a été généré, sur la base du

³¹ Pour les orthophosphates, le flux en provenance de l'agriculture a été estimé comme étant égal à celui du phosphore total

modèle numérique de terrain (Strahm, Munz, Leu, Wittmer, & Stamm, 2013). Pour le bassin versant du Doubs, les apports ont été modélisés pour les 4 tronçons considérés (→3.2).

3.3.4 Apports en provenance de l'amont (France – Amont)

Les flux de polluants en provenance de l'amont correspondent à la moyenne des flux « mesurés » en amont du périmètre d'étude. Ces derniers sont obtenus en multipliant les concentrations mesurées disponibles sur la période 2010 – 2014 à Clos Randot (nutriments et métaux) et à Morteau (micropolluants) par les débits correspondants mesurés à la station hydrométrique OFEV Sortie du lac des Brenets.

Les mesures inférieures au seuil de détection (LOD), n'ont pas été considérées. Dans le cas de mesures supérieures au seuil de détection mais inférieures au seuil de quantification (LOQ), les concentrations ont été fixées comme étant équivalentes à la moitié du seuil de quantification. Cependant si pour un polluant donné, moins de 20% des mesures sont supérieures au seuil de quantification ou si une seule mesure est disponible, le flux n'a pas été calculé pour des raisons évidentes de manque de représentativité.

4 RESULTATS

4.1 Résultats par substance

Les résultats du modèle de bilan de flux pour les différentes substances considérées sont brièvement présentés et discutés ci-après. L'ensemble des résultats est par ailleurs aussi disponible en annexe (→ Annexe 9).

Les graphiques qui suivent montrent :

- Le flux venant de l'amont du périmètre modélisé (France amont), basé sur des mesures et représenté en gris (méthode de détermination du flux amont : voir 3.2.4)
- Les flux modélisés sur le bassin versant suisse, représentés en couleurs
- Des flux mesurés, pour comparaison avec le modèle, représentés par un trait tillé (moyenne des mesures) et l'écart-type associé.

Les flux en provenance de l'amont étant directement calculés sur la base des mesures de concentrations disponibles, une distinction entre les différentes sources n'est pas possible et les flux sont représentés en gris.

Lorsque les données disponibles ne permettent pas d'estimer le flux en provenance de l'amont de manière représentative (mesures inférieures au seuil de détection et/ou en nombre non représentatif), celui-ci n'a pas été calculé et l'indication « flux amont non disponible » est ajoutée³². Pour ces substances, ce sont donc uniquement les flux ajoutés sur le territoire suisse qui sont présentés sur les graphiques. Les graphiques de ces substances ainsi que les commentaires y relatifs figurent en → Annexe 11.

De même, lorsque suffisamment de mesures sont disponibles, les flux « mesurés » à certaines stations sont indiqués en trait-tillé avec leur écart type afin de permettre une comparaison entre le modèle et les mesures. Les mesures à Refrain sont comparées aux résultats du modèle à la Combe des Sarrasins (nutriments et micropolluants), celles à Goumois avec les résultats du modèle à la Goule (métaux) et celles à Ocourt avec les résultats du modèle à Ocourt (toutes les substances).

³² Moins de 20% des mesures ou une seule mesure dépassant le seuil de détection

4.1.1 Azote

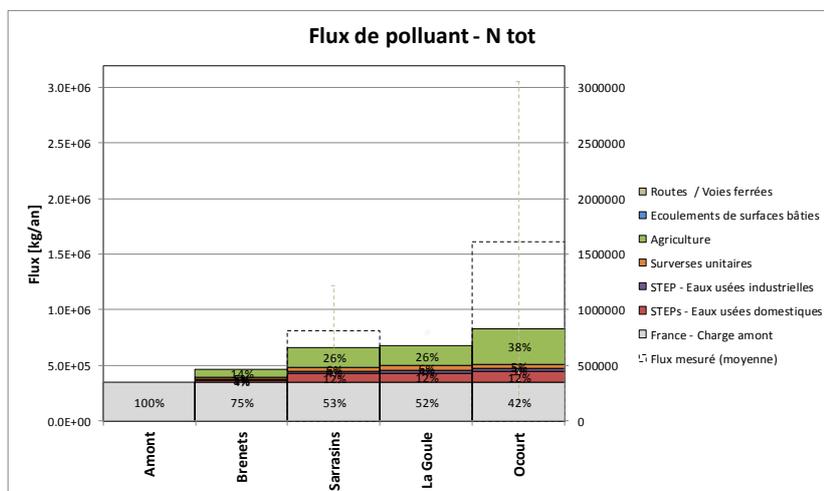


Figure 14 Flux d'azote total [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Les graphiques pour les spéciations NH₄, NO₂ et NO₃ ainsi que les commentaires y relatifs sont présentés en → Annexe 12, à titre indicatif. En effet, le modèle ne reproduit pas la nitrification dans l'environnement. Les flux de ces substances ne se conservent donc pas (transformation de l'ammonium en nitrite puis nitrate de l'amont vers l'aval), et les flux calculés par le modèle ne correspondent pas à la réalité.

Pour l'azote total, la principale contribution au flux en provenance du bassin versant suisse provient de l'agriculture. Les flux modélisés sont en dessous des flux mesurés tout en restant dans l'écart type de ces derniers. Cela peut s'expliquer en partie par le flux français en provenance de l'agriculture le long du périmètre d'étude ainsi que par la non prise en considération d'apports atmosphériques (qui représentent environ 300'000 kg/an et expliquent donc environ un tiers du « manque »).

4.1.2 Orthophosphates

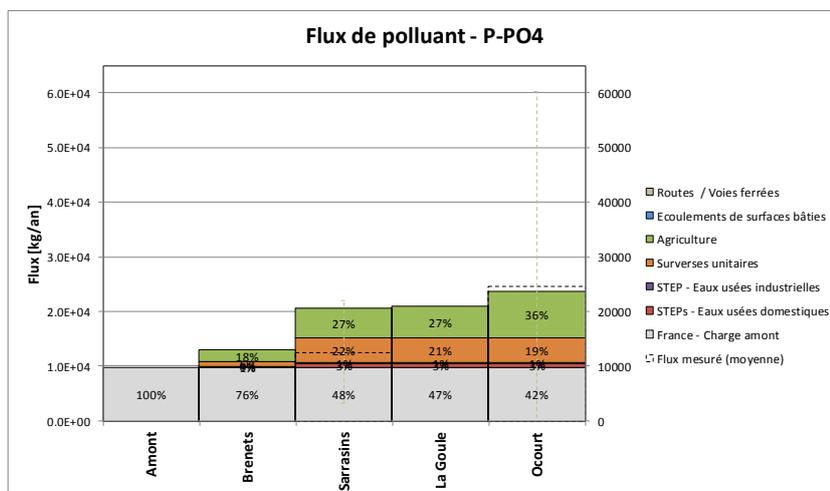


Figure 15 Flux d'ortho-phosphates [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux d'ortho-phosphates en provenance du bassin versant suisse provient majori-

tairement de l'agriculture ainsi que dans une moindre mesure des surverses unitaires. Le flux modélisé à Ocourt est quasi égal au flux mesuré, alors que le flux modélisé à la Combe des Sarrasins est supérieur au flux mesuré (Refrain). L'adéquation du modèle avec les mesures est très satisfaisante pour ce paramètre, même s'il manque la partie française du Doubs frontière.

4.1.3 Phosphore total

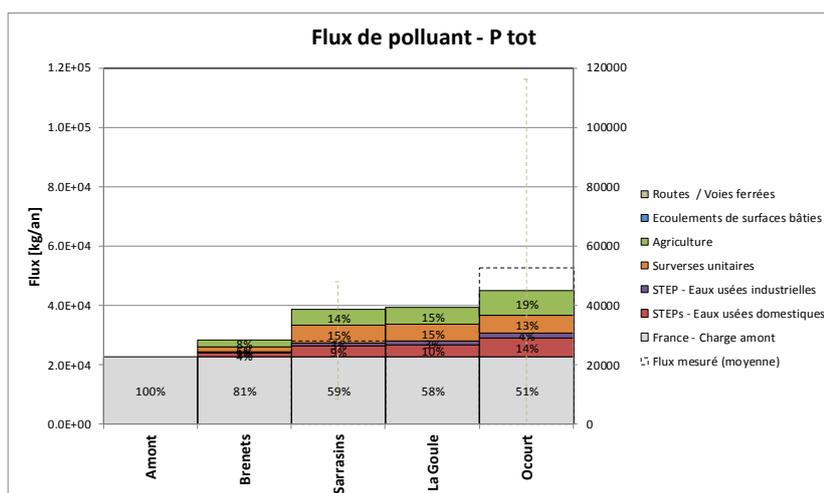


Figure 16 Flux de phosphore total [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de phosphore total en provenance du bassin versant suisse à parts quasi égales de l'agriculture, des surverses unitaires et des eaux usées domestiques. Le flux modélisé à Ocourt est légèrement inférieur au flux mesuré alors que le flux modélisé à la Combe des Sarrasins est légèrement supérieur au flux mesuré (Refrain). L'adéquation du modèle avec les mesures est très satisfaisante pour ce paramètre, même s'il manque la partie française du Doubs frontière.

4.1.4 Carbone organique dissous

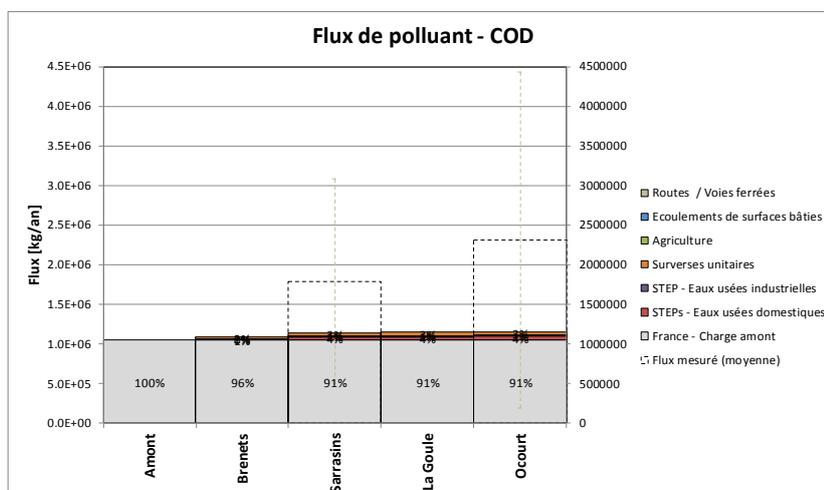


Figure 17 Flux de carbone organique dissous [kg/an] modélisés pour les 4 segments

En ce qui concerne le carbone organique dissous, la part du flux modélisé en prove-

nance du bassin versant suisse est infime en comparaison à la charge amont. Les flux modélisés sont largement inférieurs aux flux mesurés. Cette mauvaise adéquation du modèle avec les mesures s'explique par le fait que dans le Doubs, **la composante majoritaire du carbone organique dissous est d'origine naturelle et n'a dès lors pas été modélisée**. Des mesures LC-OCD effectuées par le Canton du Jura confirment cette hypothèse.

4.1.5 Chrome

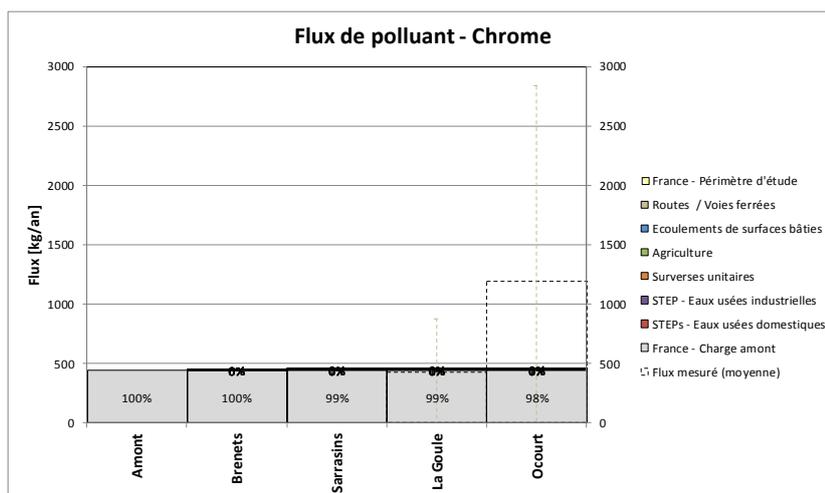


Figure 18 Flux de chrome [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Pour le chrome, la part du flux modélisé en provenance du bassin versant suisse est infime en comparaison à la charge amont mesurée. Le flux modélisé à la Combe des Sarrasins est identique au flux mesuré (Refrain) alors qu'à Ocourt, le flux modélisé est nettement inférieur au flux mesuré. On a vu au chapitre 3.3.1 que les concentrations types utilisées dans le modèle peuvent sous-estimer les apports en métaux d'un bassin versant qui a une importante composante industrielle. Finalement, le faible nombre de mesures disponibles supérieures aux limites de détection dans le milieu rend une interprétation approfondie difficile.

4.1.6 Nickel

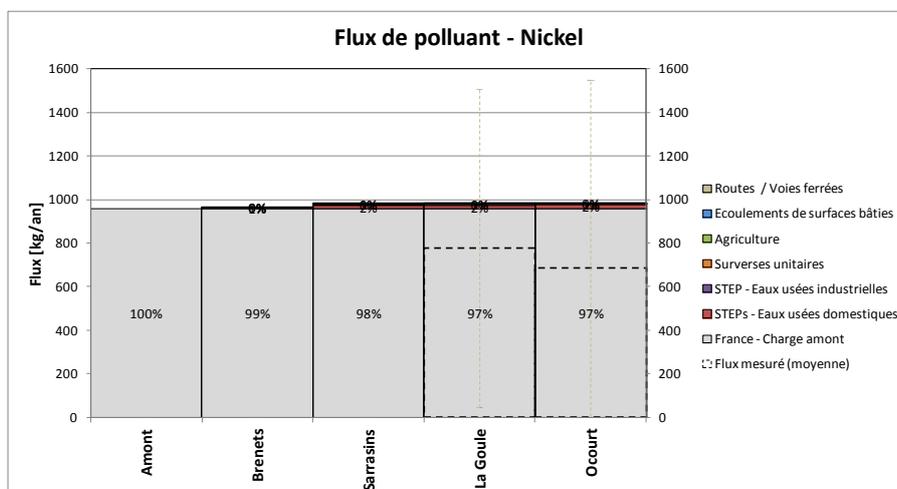


Figure 19 Flux de nickel [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux modélisé de nickel en provenance du bassin versant suisse est négligeable par rapport au flux mesuré en provenance de l'amont. Les flux mesurés sur le tronçon d'étude à Goumois et Ocourt sont inférieurs au flux amont. Le nombre de mesures situées sous le seuil de quantification est cependant à prendre en compte.

4.1.7 Plomb

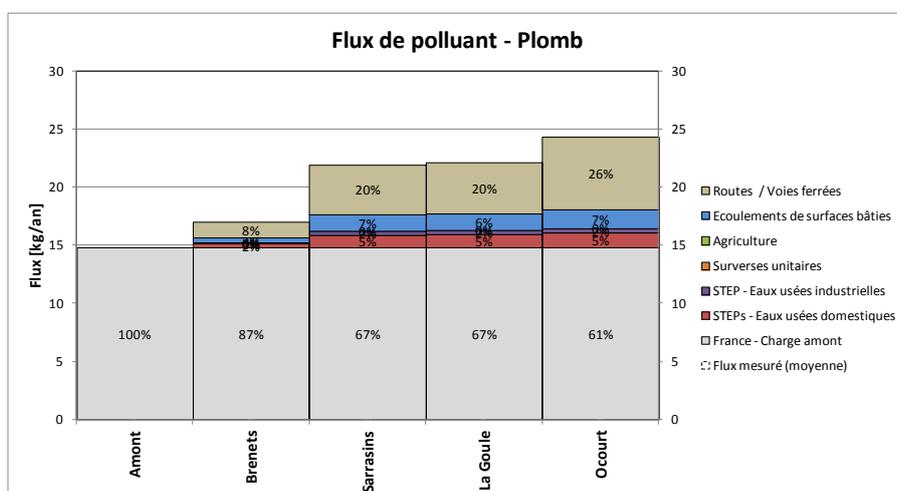


Figure 20 Flux de plomb [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de plomb modélisé en provenance du bassin versant suisse est constitué principalement des apports en provenance des routes et voies ferrées ainsi que dans une moindre mesure des écoulements de surfaces bâties et des apports des STEP. Le manque de mesures supérieures au seuil de détection sur le tronçon d'étude ne permet cependant pas de vérifier l'adéquation entre le modèle et les mesures.

4.1.8 Zinc

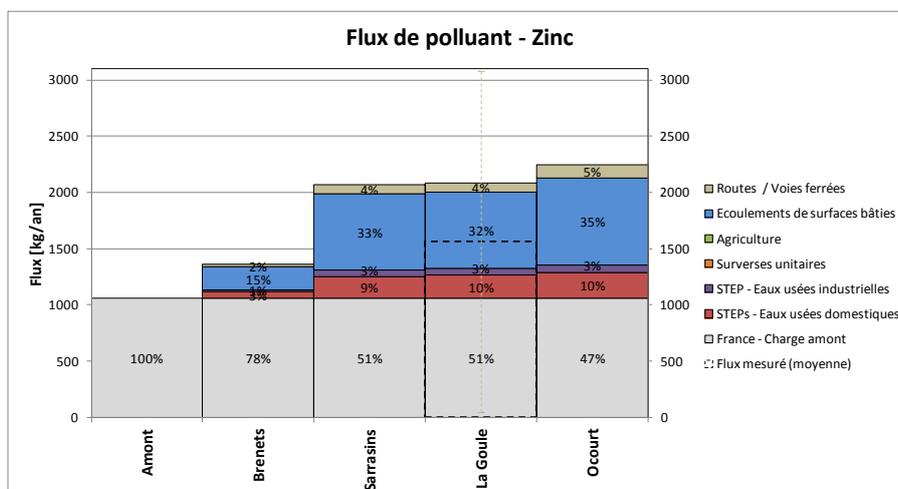


Figure 21 Flux de zinc [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Pour le zinc, la principale composante du flux modélisé pour le bassin versant suisse provient des écoulements de surfaces bâties et dans une moindre mesure des STEP et des routes et voies ferrées. Le flux modélisé à La Goule est quelque peu supérieur au flux mesuré à Goumois tout en restant situé dans l'écart type de ce dernier.

4.1.9 Cuivre

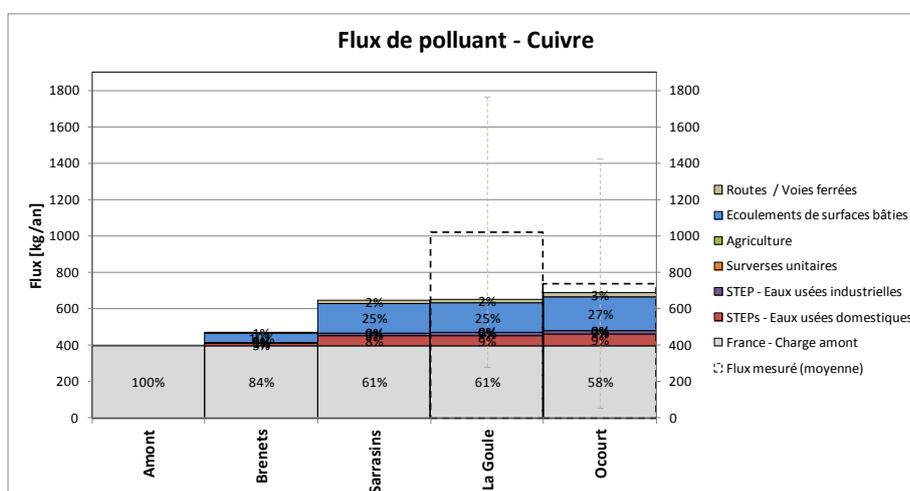


Figure 22 Flux de cuivre [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de cuivre modélisé en provenance du bassin versant suisse est constitué principalement des écoulements de surfaces bâties et dans une moindre mesure des STEP et des apports en provenance des routes et voies ferrées. Le flux modélisés à la Goule et à Ocourt sont inférieurs aux flux mesurés à Goumois et à Ocourt.

4.1.10 Acésulfame

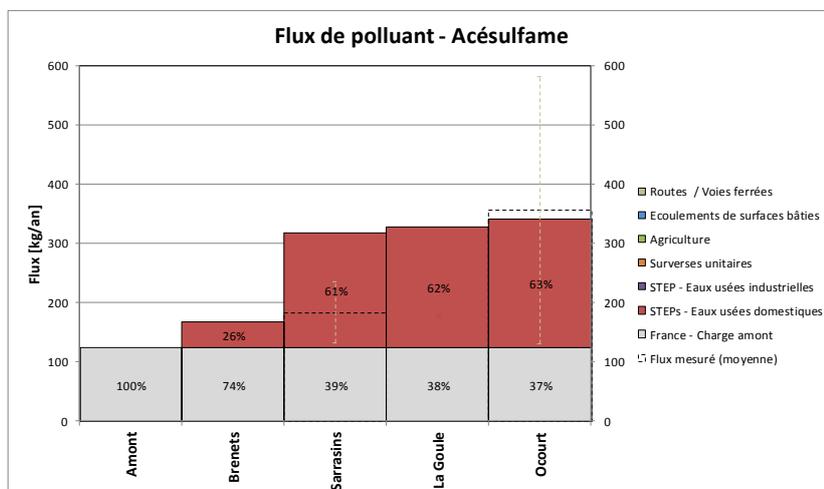


Figure 23 Flux d'acésulfame [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux d'acésulfame en provenance du bassin versant suisse est uniquement constitué des sources domestiques et est passablement supérieur à celui mesuré en provenance de l'amont. Le flux total modélisé à Ocourt correspond de manière précise au flux mesuré, ce qui illustre une bonne adéquation du modèle pour cette substance. Le flux modélisé à la Combe des Sarrasins est quant à lui passablement supérieur au flux mesuré à Refrain.

4.1.11 Benzotriazole

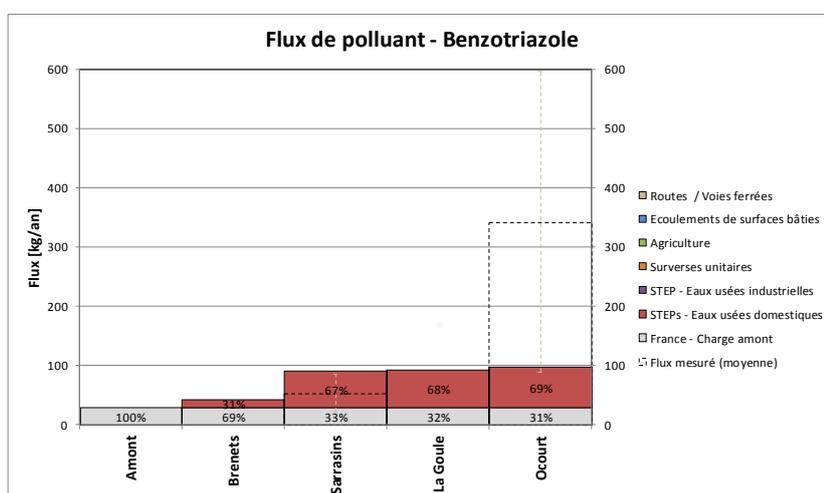


Figure 24 Flux de benzotriazole [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Pour le benzotriazole, le flux modélisé pour le bassin versant suisse est nettement supérieur au flux mesuré en provenance de l'amont. Le flux modélisé à la Combe des Sarrasins est supérieur au flux mesuré à Refrain alors qu'à Ocourt, le flux modélisé est fortement inférieur au flux mesuré tout en restant dans l'écart type de ce dernier. Le flux de benzotriazole est déterminé sur la base d'un flux spécifique par

habitant dans le bassin versant (voir chapitre 3.3.1). Manifestement, il existe une ou plusieurs sources, probablement industrielles, de cette substance. Le flux modélisé est ici trop faible par rapport à la réalité. Les émissions ponctuelles et particulières ne peuvent être modélisées plus précisément, en l'absence de données sur ces sources.

4.1.12 Carbamazépine

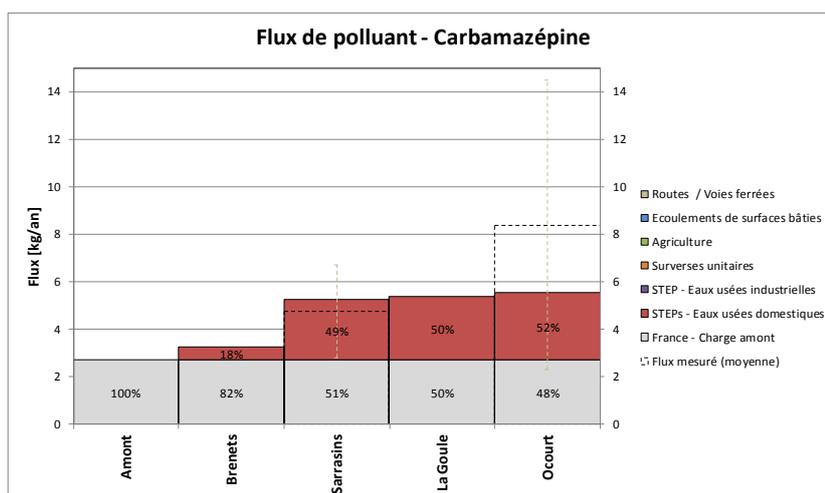


Figure 25 Flux de carbamazépine [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de carbamazépine en provenance du bassin versant suisse est uniquement constitué des sources domestiques et est d'importance similaire à celui mesuré en provenance de l'amont. Le flux total modélisé à Ocourt est quelque peu inférieur au flux mesuré, mais le flux modélisé à la Combe des Sarrasins est quant à lui quasi identique au flux mesuré à Refrain. Cela illustre une bonne adéquation du modèle pour cette substance.

4.1.13 Clarithromycine

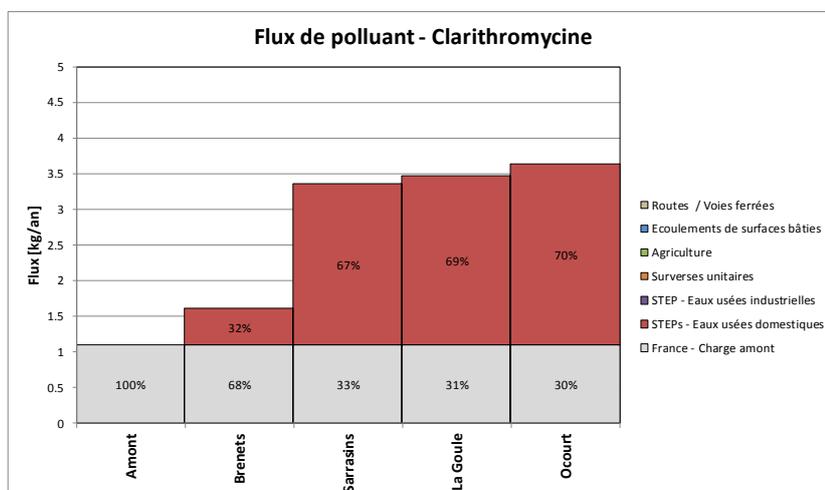


Figure 26 Flux de clarithromycine [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de clarithromycine en provenance du bassin versant suisse est uniquement

constitué des sources domestiques et est passablement plus important que celui mesuré en provenance de l'amont. L'absence de mesure supérieure au seuil de détection sur le tronçon d'étude ne permet cependant pas d'évaluer l'adéquation du modèle avec les mesures.

4.1.14 Gabapentine

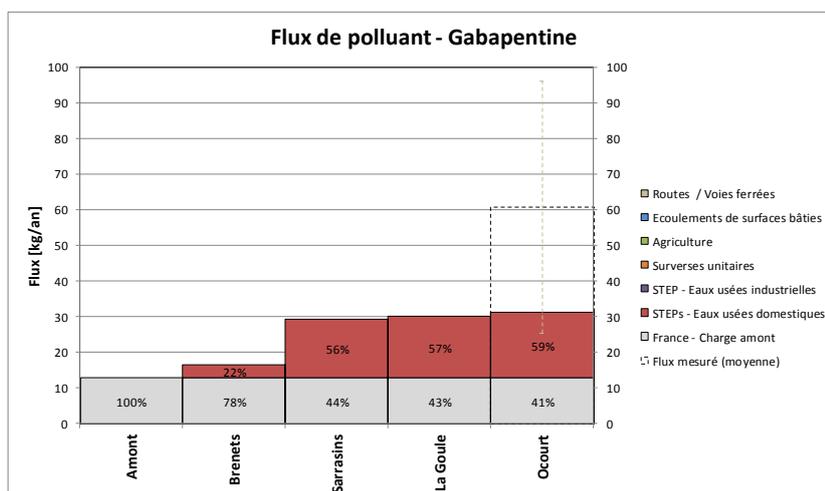


Figure 27 Flux de gabapentine [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de gabapentine en provenance du bassin versant suisse est uniquement constitué des sources domestiques et est d'importance similaire à celui mesuré en provenance de l'amont. Le flux total modélisé à Ocourt est passablement inférieur au flux mesuré tout en restant dans l'écart type de ce dernier.

4.1.15 Metformine

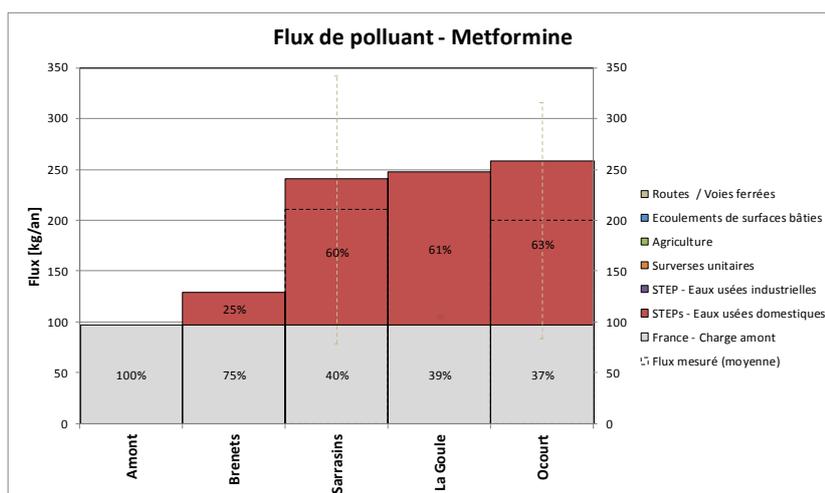


Figure 28 Flux de metformine [kg/an] modélisés pour les 4 segments

Le flux de metformine en provenance du bassin versant suisse est uniquement constitué des sources domestiques et est passablement supérieur à celui mesuré en provenance de l'amont. Les flux totaux modélisés à Ocourt et à la Combe des Sarrasins sont légèrement supérieurs aux flux mesurés (à Ocourt et à Refrain).

L'adéquation du modèle avec les mesures est donc relativement bonne pour cette substance avec une tendance de légère surestimation du flux modélisé.

4.2 Analyse et discussion

4.2.1 Interprétation générale

Bien que les différents résultats aient déjà été présentés et discuté brièvement ci-avant par polluant (→4.1), quelques interprétations générales sont présentées ici.

Pour les **flux d'origine urbaine** que représentent les STEP (industries et eaux usées domestiques), les surverses unitaires ainsi que les écoulements de surfaces bâties, une évolution des flux en forme d'escalier avec deux marches nettes peut s'observer le long du périmètre d'étude (Figure 29, gauche). La première augmentation s'observe sur le premier segment allant jusqu'à la sortie du lac des Brenets et correspond principalement aux apports en provenance du Locle alors que la seconde qui est plus importante s'observe sur le segment suivant entre la sortie du lac de Brenets et la Combe des Sarrasins et correspond principalement aux apports en provenance de la Chaux-de-Fonds. Il est tout à fait logique que les deux principales villes présentes dans le périmètre d'étude soient aussi celles qui contribuent le plus fortement aux flux de polluants d'origine urbaine.

Sur le segment compris entre la combe des Sarrasins et la Goule, l'évolution est ensuite quasi inexistante ce qui s'explique par la faible distance présente par rapport au segment précédent et donc au peu d'apports supplémentaires. Enfin sur le dernier segment compris entre la Goule et Ocourt une faible augmentation des flux est observée, ce qui correspond aux apports des différentes localités des Franches-Montagnes et du Clos-du-Doubs présentes le long de ce tronçon.

Pour les **flux d'origine agricole**, la situation est différente. Alors que l'augmentation des flux est plus limitée sur les trois premiers segments, c'est principalement sur le dernier segment entre la Goule et Ocourt que se produit la plus forte augmentation (Figure 29, droite). Cela s'explique par la présence d'une agriculture comparative-ment plus importante sur ce dernier tronçon que sur le reste du périmètre, bien que d'une intensité toujours limitée.

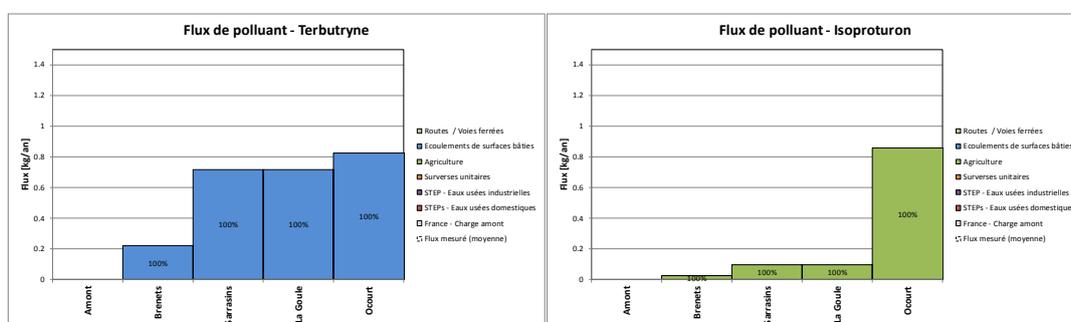


Figure 29 Evolution type des flux de polluants en provenance de sources urbaine (gauche) et agricole (droite) sur les 4 segments modélisés (sans apport amont considéré)

Par ailleurs, il ressort des résultats des différents flux que les **apports en provenance de l'amont sont généralement du même ordre de grandeur**, voire supérieurs, que ceux générés sur le territoire du bassin versant suisse du Doubs. La figure ci-dessous montre, pour quelques substances pour lesquels le flux amont et représentatif, la répartition entre l'apport amont (entrée du territoire suisse) et l'apport sur le territoire suisse jusqu'à Ocourt.

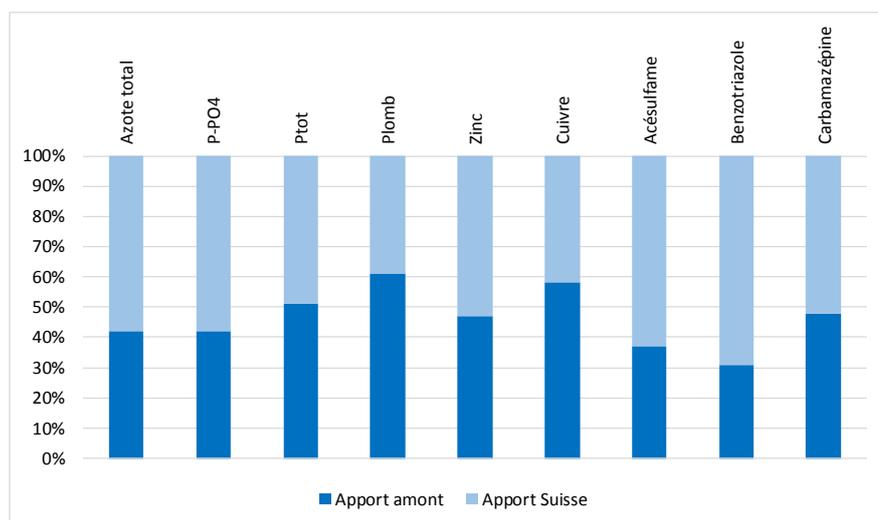


Figure 30 Proportion (en %) des apports provenant de l'amont et du territoire suisse, pour quelques substances représentatives

4.2.2 Validation du modèle

Bien que déjà brièvement discuté substance par substance (→ 4.1), l'adéquation du modèle avec les mesures est détaillée ci-après pour les différentes familles de polluants. Dans l'ensemble, l'adéquation du modèle avec les mesures peut être considérée comme étant satisfaisante à bonne et ce en particulier au vu des grandes variations de flux existantes. Les comparaisons entre les flux modélisés et mesurés pour différentes stations sont par ailleurs disponibles en annexe (→ Annexe 10).

Nutriments : L'adéquation du modèle avec les mesures est bonne pour les principaux nutriments considérés (Figure 31). Cette bonne adéquation s'explique par le fait qu'une grande partie des données utilisées dans le modèle consiste en des concentrations réelles mesurées (→ 3.3). Pour le phosphore et les orthophosphates, les valeurs modélisées sont tout à fait en adéquation avec les mesures. Pour les composés azotés, la non-prise en compte du processus de nitrification conduit logiquement à une nette surestimation des flux d'ammonium et de nitrites et à une nette sous-estimation du flux de nitrates. Par ailleurs, la non-prise en compte des apports en provenance de l'agriculture (données indisponibles) se traduit par une certaine sous-estimation des flux des composés azotés. Le modèle tend aussi à sous-estimer les flux d'azote total et de carbone organique dissous. Cela peut s'expliquer par la non-prise en compte de sources d'apports potentiels essentiellement les apports atmosphériques (4.2.3) et les apports de la France le long du périmètre d'étude (0).

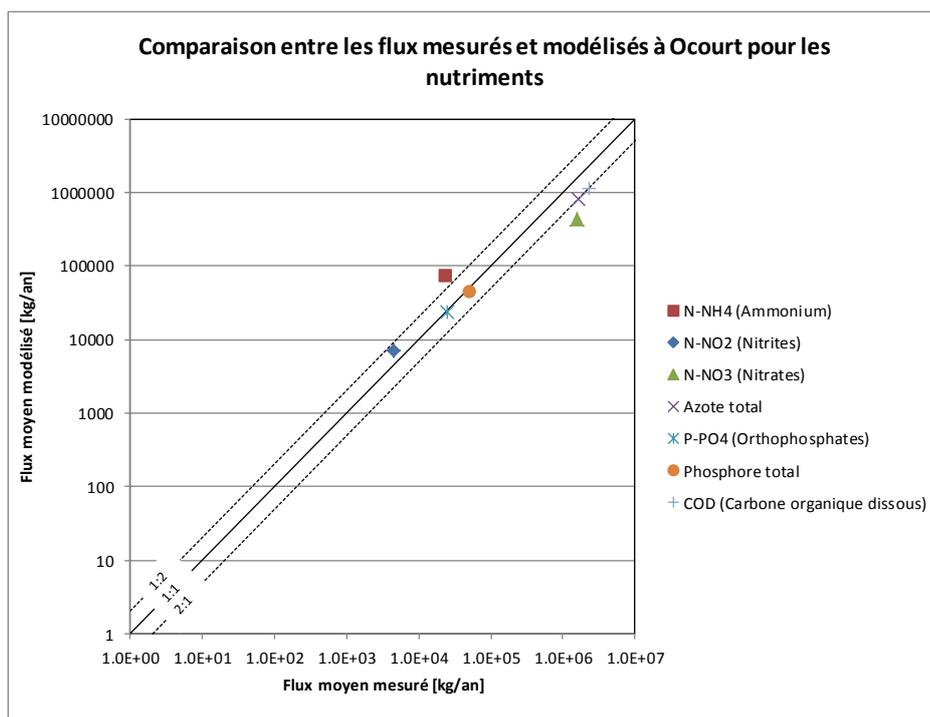


Figure 31 Comparaison entre les flux mesurés et modélisés à Ocourt pour les nutriments. Les sur-estimations pour l'ammonium et les sous-estimations pour les nitrates sont liées au fait que le modèle ne reproduit pas la nitrification ayant lieu dans le cours d'eau (voir discussion en 4.1.1)

Métaux : De manière générale l'adéquation de modèle avec les mesures est tout à fait bonne pour les métaux pour lesquels des mesures supérieures au seuil de détection sont disponible (Figure 32). En particulier, les résultats du modèle pour les flux de chrome, de nickel, de zinc et de cuivre à la Goule sont tout à fait en adéquation avec les flux mesurés à Goumois. En revanche le modèle sous-estime légèrement le flux de chrome à Ocourt. Cependant, le relativement faible nombre de mesures disponibles supérieures au seuil de détection est à prendre en compte.

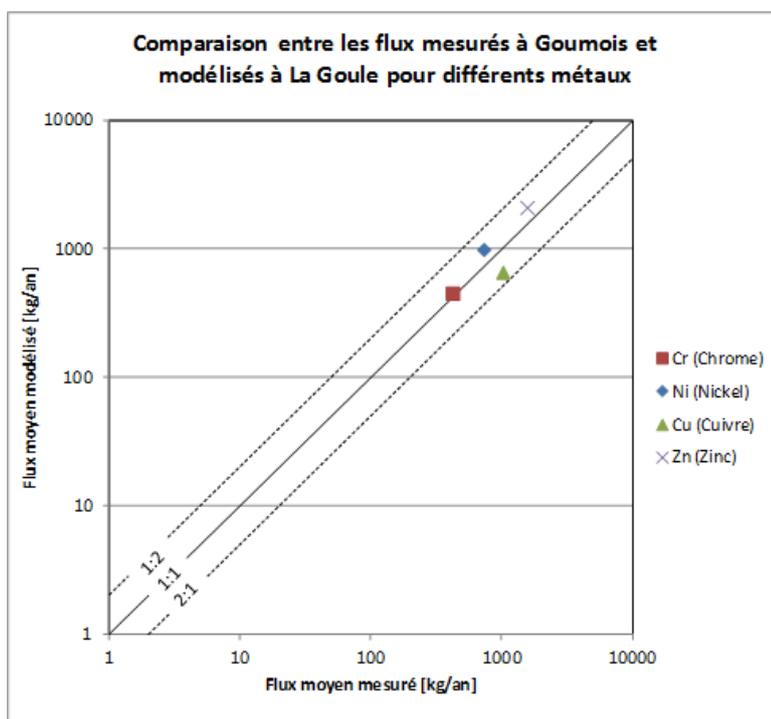


Figure 32 Comparaison entre les flux mesurés à Goumois et modélisés à la Goule pour différents métaux

Micropolluants : Pour les micropolluants, l'adéquation du modèle avec les mesures est dans l'ensemble satisfaisante avec une forte variation en fonction de la substance considérée (Figure 33). A nouveau, le faible nombre de mesures disponibles supérieures au seuil de détection est à prendre en compte. Pour l'acésulfame, qui en tant qu'additif alimentaire représente probablement la substance de comparaison la plus fiable, l'adéquation entre les mesures et le modèle est tout à fait bonne. En revanche le modèle sous-estime le flux de benzotriazole de carbamazépine et de gabapentine à Ocourt alors qu'il surestime le flux de metformine.

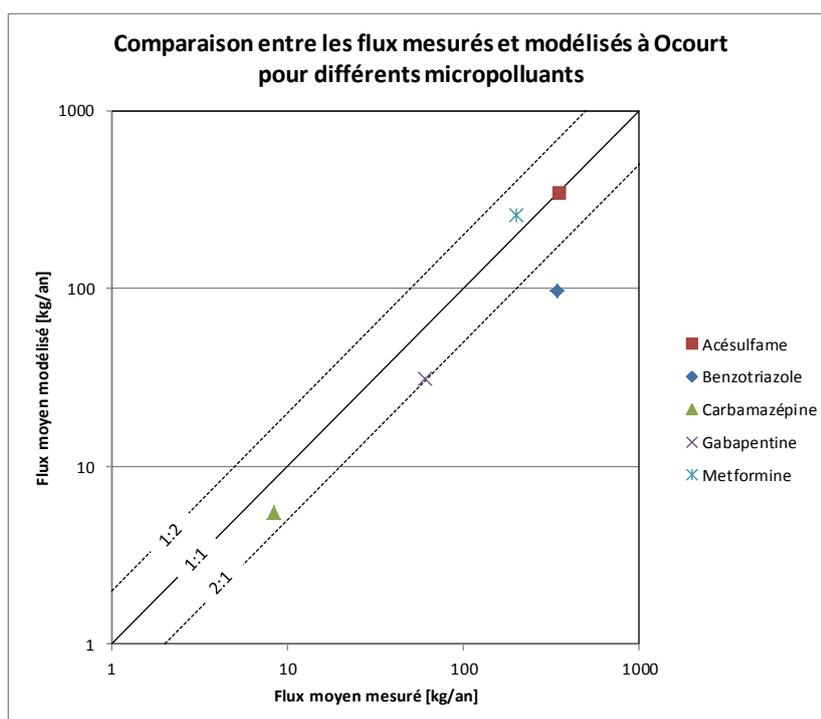


Figure 33 Comparaison entre les flux mesurés et modélisés à Ocourt pour différents micropolluants

4.2.3 Evaluation des concentrations modélisées

Bien que le but principal du présent projet soit de permettre une estimation des flux annuels de polluants et non de concentrations précises dans le Doubs, des concentrations théoriques à Ocourt ont été calculées sur la base des flux modélisés en provenance du bassin versant suisse à l'aide des débits moyen (Q_{moy}) et d'étiage (Q_{347}) mesurés (Figure 34). Il ressort de cette analyse que même pour le cas très défavorable d'estimations basées sur le Q_{347} , les concentrations sont systématiquement en dessous des limites de toxicité chronique pour les différents micropolluants.

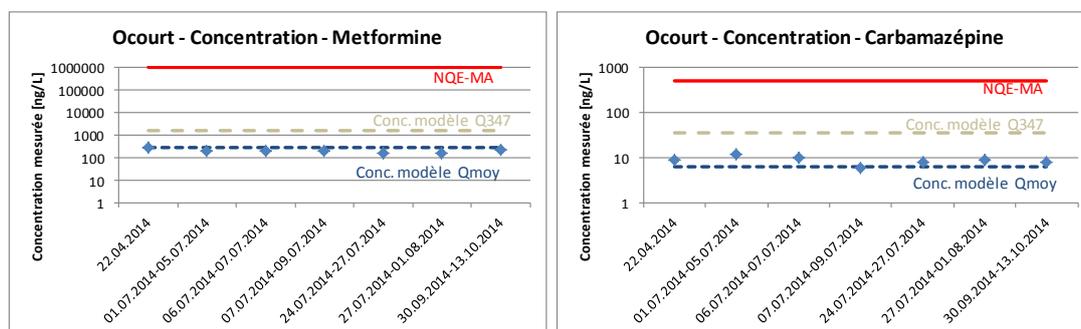


Figure 34 Concentrations de metformine (gauche) et de carbamazépine (droite) mesurées (points bleus) et concentrations modélisées à Ocourt avec Q_{moy} (trait-tiret bleu) et avec Q_{347} (trait-tiret gris). NQE-MA : norme de qualité environnementale pour l'exposition chronique (moyenne annuelle).

Les quotients de risques (RQ) calculés pour les différents micropolluants sont résumés dans le Tableau 14. Ceux-ci représentent les rapports entre les concentrations « modélisées » (obtenues sur la base des flux modélisés à Ocourt et du débit moyen

(Qmoy) et d'étiage (Q347)) et les valeurs d'exposition chronique (NQE-MA) telles que définies par le centre Ecotox.

Micropolluant considéré	Limite Ecotox NQE-MA [ng/L] ³³	Flux modélisé [kg/an] ³⁴	RQ - Q moy	RQ - Q347
Acésulfame	-	340.94	-	-
Benzotriazole	30000	97.94	0.0034	0.0188
Carbamazépine	500	5.53	0.0115	0.0636
Carbamazépine-DI-OH	-	-	-	-
Clarithromycine	60	3.63	-	-
Diclofénac	50	-	-	-
Diuron	20	-	-	-
Gabapentine	-	31.28	-	-
Glyphosate	108000	-	-	-
Isoproturon	320	-	-	-
MCPA	1340	-	-	-
Metformine	1000000	258.01	0.0003	0.0015
Métolachlore	690	-	-	-
Métoprolol	64000	-	-	-
Nonylphénol, iso-	13	-	-	-
Sulfaméthoxazole	600	-	-	-
Terbutryne	65	-	-	-

Tableau 14 Quotients de risques (RQ) pour les différents micropolluants calculés sur la base des concentrations modélisées avec un débit moyen (Qmoy) et d'étiage (Q347) à Ocourt et des limites d'exposition chronique (NQE-MA) définies par le centre Ecotox

4.2.4 Apports atmosphériques

Afin d'évaluer l'importance des apports en polluants d'origine atmosphérique, des mesures effectuées dans 44 pluies tombées à St-Ursanne par le service de l'environnement du canton du Jura (ENV) sur la période 2010 – 2014 ont été utilisées. Parmi les polluants considérés dans cette étude, seuls les composés azotés sont mesurés dans la pluie. Les valeurs moyennes des mesures de concentration en ammonium, nitrates et nitrites dans l'eau de pluie ont donc été additionnées afin de calculer une concentration moyenne en azote total (hypothèse identique utilisée dans le modèle). Cette dernière a ensuite été multipliée par une pluie annuelle moyenne type (1000 mm/m²/an) et par la surface du bassin versant suisse (397 km²). Cela résulte en un flux d'azote atmosphérique d'environ 300'000 kg/an pour l'ensemble du bassin versant suisse. Cette valeur non négligeable correspond approximativement au flux total d'azote en provenance de l'agriculture à Ocourt.

³³ Certaines substances n'ont aucune limite en exposition chronique (NQE-MA) définie

³⁴ Seuls les flux modélisés complètement (y compris amont) sont indiqués dans le tableau

5 CONCLUSIONS

La présente étude ne montre pas d'éléments nouveaux indiquant un problème particulier de qualité des eaux. Les concentrations de substances mesurées dans le Doubs correspondent à des niveaux en général faibles à moyens, avec une amélioration de l'amont vers l'aval, ce qui signifie que la qualité de l'eau est meilleure à Ocourt (à la sortie du territoire suisse) qu'à l'amont. Cette observation traduit par ailleurs bien l'occupation du bassin versant, avec des agglomérations plus importantes à l'amont.

La présente étude n'apporte pas d'élément explicatif nouveau relatif aux mortalités piscicoles. En particulier, l'étude ne porte que sur la qualité de l'eau dans le Doubs, et n'a donc pas abordé la qualité des sédiments, le régime hydrologique, l'écomorphologie et d'autres aspects environnementaux relevant de la qualité du milieu.

Le modèle de flux de la présente étude a été établi pour **quantifier et objectiver les apports des différents secteurs géographiques et sources de polluants dans le Doubs**. Cet objectif a pu être largement atteint. La prédiction de concentrations dans le Doubs est par contre plus incertaine.

En généralisant grossièrement, il est possible de dire que la charge amont en provenance de la France représente (pour les substances ne se dégradant pas dans l'environnement) environ la moitié du flux en sortie de périmètre d'étude (sortie Ocourt), avec toutefois une variabilité en fonction du paramètre considéré. Sur la partie suisse, l'apport provient majoritairement des 2 agglomérations neuchâtelaises (Le Locle, La Chaux-de-Fonds).

Si le modèle développé permet de disposer d'une bonne image générale des flux de substances et nutriments dans le Doubs, elle ne permet en aucun cas une analyse exhaustive de potentiels problèmes locaux. En particulier, la forte hétérogénéité temporelle et géographique des mesures disponibles ne permet pas d'identifier des impacts localisés ou de courte durée (par exemple : un déversement d'eaux mixtes lors d'un débit d'étiage dans le Doubs, ou l'aval immédiat d'un rejet de STEP, avant mélange complet). Ces situations ne font pas partie de l'approche « bilan de flux » et doivent être traitées par le biais d'approches spécifiques.

La présente démarche pourrait se poursuivre avec la **mise au point d'un modèle similaire pour le bassin versant français**, qui permettrait de remplacer les flux amont mesurés par ceux modélisés, et compléter les flux non considérés de la partie française du Doubs frontière. Avec l'assemblage des deux modèles, une calibration affinée pourrait ensuite être effectuée.

Les données de base récoltées pourraient aussi servir à **systematiser et coordonner le suivi de la qualité de l'eau**, notamment en vue d'un **monitoring de l'effet des mesures** qui seront prises ces prochaines années.

Finalement, l'étude améliore les connaissances sur l'état de la qualité des eaux du Doubs.

6 BIBLIOGRAPHIE

Bassin versant du Doubs

- EPTB Saône & Doubs, 2011. *Projet intégré Doubs franco-suisse, Etat des lieux / diagnostic du bassin versant, Rapport principal validé par le comité technique de pilotage en mai 2011.*
- OFEV, 27.03.2014. *Démarche suisse pour l'amélioration de la connaissance, Apports vers le Doubs de polluants et nutriments à partir du bassin versant suisse, Projet « bilan de flux », Cahier des charges*
- République et canton du Jura - département de l'environnement et de l'équipement, 2012. *PSeaux Module 33 Doubs – Rapport phase 1, Etat actuel et déficits, version finale a – 30 janvier 2012.* Etude réalisée par BG ingénieurs conseils
- République et canton de Neuchâtel - département de la gestion du territoire, services de l'énergie et de l'environnement 2012. *Bassin du Doubs neuchâtelois, Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface – Rapport principal du 17 août 2012.* Etude réalisée par Aquarius, Aquabug et PhycoEco.

Qualité de l'eau

- OFEV 2013, Observation nationale de la qualité des eaux de surface (NAWA) Premiers résultats
-
- BAFU 2013: NAWA – Nationale Beobachtung Oberflächengewässerqualität. Konzept Fließgewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1327

Quantification des apports diffus

- Prasuhn, V., & Hürdler, J. (2014). *Stoffflussmodell MODIFFUS - Gewässerschutz und Stoffflüsse. Abgerufen am 08. 05 2015 von <http://www.agroscope.admin.ch/gewaesserschutz-stoffhaushalt/00755/07887/07892/index.html?lang=de>*
- Hahn, C., V. Prasuhn, C. Stamm, and R. Schulin. 2012. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 153:65 - 74.
- Strahm, I., Munz, N., Leu, C., Wittmer, I., & Stamm, C. (5 2013). *Landnutzung entlang des Gewässernetzes - Quellen für Mikroverunreinigungen.* aqua & gas, 2013, Bd. N5/13S. 36 - 44
- Stauffer, Philipp und Ort, Christoph. Diffuse Einträge aus Siedlungen - Ergebnisse einer Situationsanalyse. *Aqua & Gas.* 11/2012 2012.

Micropolluants

- Bürge, I., 2009. *Ubiquitous Occurrence of the Artificial Sweetener Acesulfam in the Aquatic Environment: An Ideal Chemical Marker of Domestic Wastewater in the Groundwater*. Environ Sci. Technol, 43, 4381-4385
- Götz, C. et al., 2010. *Mikroverunreinigungen - Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen, s.l.: Gas, Wasser, Abwasser*. GWA 4/2010
- Otto, J., Singer, H. & Götz, C., 2014. *Substanzen zur Überprüfung des Reinigungseffekts weitergehender Abwasserbehandlungsverfahren - Studie im Auftrag des BAFU, Dübendorf und Zofingen*: Eawag / Envilab
- Moschet, C., W. Wittmer, J. Simovic, M. Junghans, A. Piazzoli, H. Singer, C. Stamm, C. Leu, and J. Hollender. 2014. How a complete pesticide screening changes the assessment of surface water quality. Environmental Science & Technology 48:5423–5432, dx.doi.org/10.1021/es500371t.
- Götz, C., Stamm, C., Fenner, K., Singer, H., Schärer, M., and Hollender, J. (2010). Targeting aquatic microcontaminants for monitoring: exposure categorization and application to the Swiss situation. Environmental Science and Pollution Research: 17: 341 - 354, DOI 10.1007/s11356-009-0167-8.
- Moschet, Christoph. Georeferenced Mass Flux Modelling of Selected Micropollutants in the Catchment of Lake Constance. Dübendorf : Master-Thesis, Eawag, 2010.
- Wittmer, I., M. Junghans, H. Singer und C. Stamm (2014), „ Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus diffusen Einträgen“. Studie im Auftrag des BAFU. Eawag, Dübendorf
- Philipp Longrée, Jelena Simovic und Heinz Singer; Eawag, 2013, Screening von Pharmazeutika, Haushalts- und Industriechemikalien in ausgewählten Einzugsgebieten des nationalen SPEZ Messnetzes für Oberflächengewässer, Eawag, Dübendorf