



RÉPUBLIQUE ET CANTON DE NEUCHÂTEL

DÉPARTEMENT DE LA GESTION DU TERRITOIRE
SERVICES DE L'ÉNERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

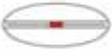


BASSIN DU DOUBS NEUCHÂTELOIS

Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface

Rapport principal

CH-Neuchâtel, le 17 août 2012

PhycoEco 
Laboratoire d'algologie

Rue des XXII-Cantons 39
CH-2300 La Chaux-de-Fonds
Tél.: +41 79 321 23 24
www.phycoeco.ch

AQUABUG
Sciences naturelles
et environnement

Avenue de la Gare 29
CH-2000 Neuchâtel
Tél.: +41 32 753 01 23



BP 1767, CH-2001 Neuchâtel
Tél.: +41 32 724 72 62
Fax.: +41 32 835 30 78
www.netaquarius.ch

Bureau pilote :
AQUARIUS : Jérôme Plomb, Blaise Zaugg



Mandant :	Dernière modification :
République et canton de NE - SENE	Neuchâtel, le 17 août 2012

Table des matières

1. INTRODUCTION – CADRE	7
2. OBJECTIFS	8
3. DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE	8
4. CONTEXTE ET POLITIQUE INTERNATIONALE	9
4.1 <i>Au niveau Suisse</i>	10
4.2 <i>Au niveau Français</i>	10
5. BASSIN VERSANT	11
5.1 <i>Historique – force hydraulique</i>	13
5.2 <i>Bassin géographique et de population</i>	13
5.3 <i>Couverture du sol</i>	14
5.4 <i>Géologie – Karst</i>	15
5.5 <i>Sources polluantes d'origine anthropique</i>	17
5.5.1 Particularité et sensibilité du système karstique	17
5.5.2 Sources de pollutions des eaux superficielles.....	17
5.6 <i>Usines hydroélectriques</i>	19
5.7 <i>Ecomorphologie – connectivité</i>	20
5.8 <i>Réseaux de suivi</i>	21
6. HYDROLOGIE	23
6.1 <i>Régime hydrologique du Doubs</i>	23
6.1.1 Stations de mesure hydrologiques.....	24
6.1.2 Evénements extrêmes	25
6.1.2.1 <i>Basses eaux</i>	25
6.1.2.2 <i>Hauts eaux</i>	25
6.1.3 Aperçu et analyse des dernières années.....	25
6.2 <i>Perturbation du régime hydrologique du Doubs</i>	28
6.2.1 Exploitation de la force hydraulique	28
6.2.2 Le Châtelot	31
6.2.2.1 <i>Généralités</i>	31
6.2.2.2 <i>Gestion de la retenue</i>	32
6.2.2.3 <i>Débit résiduel</i>	32
6.2.2.4 <i>Eclusées - évolution</i>	34
6.2.2.5 <i>Charriage, purges et vidanges</i>	38
6.2.3 Degré de perturbation du régime hydrologique.....	39
6.2.3.1 <i>Indicateur hydrologique</i>	40
6.2.3.2 <i>Indicateurs habitationnels</i>	42
6.2.3.3 <i>Indicateurs biologiques</i>	45
6.2.3.4 <i>Bilan - perspectives</i>	46
7. PHYSICO-CHIMIE	47
7.1 <i>Généralités</i>	47
7.1.1 STEP de la Chaux-de-Fonds	48
7.1.2 STEP du Locle	50
7.1.3 STEP des Brenets.....	53
7.1.4 Projet d'assainissement	54

7.2	Suivis et données existantes	55
7.2.1	Données suisses.....	55
7.2.2	Données françaises.....	57
7.3	Méthodes utilisées pour le diagnostic	58
7.3.1	En Suisse.....	58
7.3.1.1	<i>Stations d'échantillonnage de la qualité des eaux</i>	58
7.3.1.3	<i>Critères et valeurs de références pour les évaluations</i>	59
7.3.2	En France.....	60
7.4	Résultats	61
7.4.1	Nutriments dans les eaux courantes.....	61
7.4.2	Micropolluants.....	70
7.4.3	Qualité chimique des sédiments.....	71
7.4.4	Bioaccumulation dans la chair des poissons.....	73
7.5	Discussion	74
8.	HYDROBIOLOGIE	75
8.1	Périphyton	75
8.1.1	Suivis et données existantes anciennes.....	76
8.1.2	Prélèvements réalisés en 2011.....	76
8.1.3	Méthodes utilisées pour le diagnostic.....	79
8.1.4	Résultats bruts.....	79
8.1.5	Etat des peuplements de diatomées.....	80
8.1.6	Indications de qualité biologique des eaux.....	87
8.1.7	Cyanobactéries (algues bleues) à la surface des sédiments.....	92
8.1.8	Echantillons divers.....	94
8.1.9	Conclusion.....	96
8.2	Macrofaune benthique	99
8.2.1	Généralités.....	99
8.2.2	Suivis et données existantes.....	99
8.2.2.1	<i>Stations analysées en 2011</i>	99
8.2.2.1	<i>Données existantes</i>	100
8.2.3	Méthode utilisée pour le diagnostic.....	101
8.2.3.1	<i>IBCH</i>	101
8.2.3.2	<i>SPEAR index</i>	102
8.2.3.3	<i>Listes rouges des macroinvertébrés benthiques EPT</i>	103
8.2.3.4	<i>Archivage des données (contrôle qualité)</i>	103
8.2.4	Résultats.....	104
8.2.4.1	<i>IBCH</i>	104
8.2.4.2	<i>Spear Index</i>	105
8.2.4.3	<i>Listes rouges des macroinvertébrés benthiques EPT</i>	107
8.2.4.4	<i>Observations ponctuelles liées aux éclusées</i>	110
8.2.5	Conclusion.....	112
8.3	Faune piscicole	113
8.3.1	Généralités.....	113
8.3.1.1	<i>Faune piscicole actuelle du Doubs, y compris les retenues</i>	113
8.3.1.2	<i>Importance du Doubs comme habitat piscicole</i>	114
8.3.1.3	<i>Activités halieutiques</i>	115
8.3.1.4	<i>Repeuplements</i>	116
8.3.2	Suivis et données existantes.....	117
8.3.2.1	<i>Les poissons comme indicateurs</i>	117
8.3.2.2	<i>Type de suivis</i>	118
8.3.3	Méthodes.....	119
8.3.3.1	<i>Méthode de pêche</i>	119

8.3.3.2	<i>Interprétation des résultats</i>	119
8.3.4	Résultats 2011	120
8.3.4.1	<i>Résultats des pêches françaises</i>	120
8.3.4.1	<i>Résultats de la pêche suisse</i>	122
8.3.5	Déclin et mortalité piscicoles	125
8.3.5.1	<i>Perturbation de l'activité de reproduction</i>	128
8.3.5.2	<i>Mortalité des alevins, juvéniles et petites espèces</i>	128
8.3.5.3	<i>Qualité des eaux et du sédiment</i>	129
8.3.5.4	<i>Atteinte aux ressources alimentaires</i>	129
8.3.5.5	<i>Déplacements et dévalaison</i>	130
8.3.5.6	<i>Perturbation des habitudes et du cycle de vie</i>	130
8.3.5.7	<i>Evolution des régimes thermiques</i>	131
8.3.5.8	<i>Maladies et organismes pathogènes</i>	133
8.3.5.9	<i>Problèmes liés aux algues</i>	135
8.3.5.10	<i>Mortalité au travers des turbines</i>	135
9.	SYNTHESE ET CONCLUSION	137
10.	ACTIONS PRIORITAIRES	139
11.	ETUDES COMPLEMENTAIRES	139
12.	PRINCIPALE BIBLIOGRAPHIE CONSULTÉE ET CITÉE	143
13.	ANNEXES	149

Liste des figures

Figure 1	Extrait du réseau hydrographique du département du Doubs. En rouge figure le bassin du Doubs Neuchâtelois.	11
Figure 2	Couverture du sol (surfaces primaires - V25, d'après Swisstopo 2010).	14
Figure 3	Extrait du parcours de l'eau d'alimentation de la Chaux-de-Fonds entre sa zone de captage et son rejet dans la nature. © Institut suisse de spéléologie et de karstologie, ISSKA 2008.	16
Figure 4	Extrait adapté de la qualité des eaux superficielles et sources de pollution – Haut-Doubs. Comité de bassin RMC, 1995. Complété par AQUARIUS, 2011.	18
Figure 5	Extrait adapté de : État physique des milieux aquatiques superficiels - Origine des perturbations, Haut-Doubs. Comité de bassin RMC, 1995. Complété par AQUARIUS, 2011.	19
Figure 6	Les types de régime d'écoulement de la Suisse sont représentés au moyen des bassins de bilan de la Suisse. L'ordre des types de régime et des codes pour les types 11 et 12 se réfère au travail original d'Aschwanden et Weingartner (1985).	23
Figure 7	Situation des stations de mesures hydrologiques gérées par la Division hydrologie de l'OFEV.	24
Figure 8	Graphique des débits moyens mensuels mesurés à la station fédérale de la Combe des Sarrasins. La représentation des données n'est pas adaptée mais offre une bonne lisibilité.	26
Figure 9	Graphique représentant la fréquence des jours avec un débit d'étiage inférieur à 10 m ³ /s.	26
Figure 10	Graphique illustrant pour chaque mois les pointes maximales de débit (crue maximale). La représentation des données n'est pas adaptée mais offre une bonne lisibilité.	27
Figure 11	Graphique des débits moyens annuels.	27
Figure 12	Situation des installations hydroélectriques de plus de 300 kW fonctionnant par éclusées (Limnex, 2001).	28
Figure 13	Synthèse du fonctionnement des trois centrales du Doubs franco-suisse fonctionnant par éclusées. Le présent schéma synthétise les mesures décrites dans les concessions du Châtelot, dans le règlement d'eau de 1969 et dans l'Accord cadre du 30 juin 2003 concernant l'amélioration des écosystèmes dans le Doubs franco-suisse par la gestion des débits d'eau permanents. Les mesures volontaires entreprises depuis 2009 ne sont pas prises en considération dans le tableau. Source : Forces motrices de la Goule, 2007, adapté.	30
Figure 14	Comparaison d'un tronçon court-circuité à la Goule avec débit de restitution de 0.68 m ³ /s à gauche et après déversement d'une éclusée provenant du Châtelot à droite (environ 20 m ³ /s).	30
Figure 15	Volume utile du lac de Moron - relation hauteur/volume (Groupe E, 07.03.2006).	32
Figure 16	Vue du Tronçon court-circuité de l'installation du Châtelot avec le débit de dotation de 2 m ³ /s.	33
Figure 17	Vue du Doubs à l'aval de l'usine du Châtelot avec un débit d'étiage d'approx. 4 m ³ /s.	33
Figure 18	Turbinage de pointe du Châtelot à la station provisoire de la Rasse (1992-1993) – Eclusées caractéristiques (DIREN, 1994)....	35

Figure 19	Comparaison des amplitudes moyennes : tiers inférieur, moyen et supérieur, entre 2000, 2004 et 2006.....	36
Figure 20	Graphique des variations journalières de débit provoquées par les éclusées lors de l'année 2000.	36
Figure 21	Graphique des variations journalières de débit provoquées par les éclusées lors de l'année 2004.	37
Figure 22	Graphique des variations journalières de débit provoquées par les éclusées lors de l'année 2006.	37
Figure 23	Extrait du suivi de la station fédérale de mesure hydrologique de la Combe des Sarrasins, extrait du relevé au mois de juillet 2011. En abscisse, chaque trait noir représente une journée.	38
Figure 24	Graphique des débits mesurés dans trois stations au cours du mois de janvier 2006.	39
Figure 25	Règle de classement HYDMOD pour le phénomène d'éclusées (BG, 2011).	41
Figure 26	Principe schématique de la longueur mouillée et de l'espace vital.....	42
Figure 27	Profils en travers utilisés en 1994 par la DIREN pour évaluer la surface mouillée impactée par les éclusées. Exemple du profil n° 18.	43
Figure 28	Relation hauteur/débit (courbe de tarage), station LH-2270. Pour une éclusée « typique d'amplitude de 40 m ³ /s, Δh > 100 cm.	44
Figure 29	Relation hauteur/débit (courbe de tarage), station LH-2370. Pour une éclusée « typique d'amplitude de 40 m ³ /s, Δh > 87 cm.	44
Figure 30	Comparaison des densités et des compositions en taille des échantillons de truites capturées sur la station du Câble en septembre 1994, octobre 1996 et septembre 1999 (effectifs bruts capturés en deux passages ramenés à la même surface).	45
Figure 31	Stations neuchâtelaises de suivi de la qualité des eaux et des sédiments du bassin du Doubs. La station n° 2406 se situe en faciès lotique, ce qui la distingue de la station proche de prélèvement des sédiments lacustres.....	56
Figure 32	Répartition des sédiments accumulés depuis la construction du barrage jusqu'en 2006 – épaisseurs en mètres. Cette carte a été employée pour déterminer les sites les plus pertinents devant faire l'objet de prélèvements de sédiments.	59
Figure 33	Utilisation de « valeurs de référence » par treize cantons analysant/ayant déjà analysé des sédiments en place (une graduation signifie une occurrence du critère par canton). D'après EAWAG, 2011.	60
Figure 34	Concentrations instantanées en ammonium mesurées entre 1993 et 2011.	62
Figure 35	Concentrations instantanées en nitrites mesurées entre 1993 et 2011.	62
Figure 36	Concentrations instantanées en nitrates mesurées entre 1993 et 2011.	63
Figure 37	Concentrations instantanées en ortho-phosphates mesurées entre 1993 et 2011.	63
Figure 38	Concentrations instantanées en chlorures mesurées entre 1993 et 2011.....	64
Figure 39	Concentrations instantanées en sulfates mesurées entre 1993 et 2011.	64
Figure 40	Concentrations instantanées en carbone organique dissous mesurées entre 1993 et 2011.	65
Figure 41	Concentrations instantanées en nitrites mesurées sur 5 stations du Doubs entre 1993 et 1994, de l'amont vers l'aval.	67
Figure 42	Concentrations instantanées en ammonium mesurées sur 5 stations du Doubs entre 1993 et 1994, de l'amont vers l'aval.	67
Figure 43	Concentrations instantanées en nitrites mesurées sur 5 stations du Doubs en 2005, de l'amont vers l'aval.	68
Figure 44	Concentrations instantanées en ammonium mesurées sur 5 stations du Doubs en 2005, de l'amont vers l'aval.	68
Figure 45	Concentrations instantanées en nitrites mesurées sur 5 stations du Doubs 2011, de l'amont vers l'aval.....	69
Figure 46	Concentrations instantanées en ammonium mesurées sur 5 stations du Doubs en 2011, de l'amont vers l'aval.	69
Figure 47	Densité des peuplements de diatomées épilithiques d'amont en aval du tronçon neuchâtelais du Doubs. En rouge: mesures 2011. En noir : mesures 2005 et 2008.....	80
Figure 48	Distribution des densités des peuplements en fonction des vitesses des eaux mesurées à chaque endroits. En enlevant les trois valeurs les plus discriminantes (1 = Aval Source Verrerie 2011, 2 = Amont Source Verrerie 2005, 3 = Clos-Rondot 2011), la régression montre que les variations de vitesse expliquent le 87.0% des variations de densité selon une fonction logarithmique (encadré noir).	81
Figure 49	Distribution des taux de fragmentation des diatomées en fonction des vitesses des eaux pour les 14 échantillons analysés en 2011. Ces taux ne sont pas significatifs de mortalité anormale (< 60% pour des vitesses ≥ 0.2 m/s), sauf à l'Usine du Refrain.	82
Figure 50	Distribution des taux de formes tétratologiques trouvées dans les assemblages de diatomées. Dans l'état actuel des connaissances, des taux de 1% sont déjà significatifs de conditions anormales de développement des diatomées, bien que certains auteurs considèrent que des taux moindres le sont aussi.	83
Figure 51	Taux de représentation (en % de cellules) des catégories de raréfaction selon la liste rouge des diatomées d'Europe centrale (Lange-Bertalot 1996) dans les communautés du Doubs. En haut pour l'eau courante enregistrés par l'épilithon, en bas à l'interface eau/sédiment enregistré par l'épipélon.....	85
Figure 52	Distribution d'amont en aval des valeurs de DI-CH calculées à partir des communautés épilithiques et épipéliques de diatomées en 1963, 2005, 2008 et 2011. A gauche les cinq classes de qualité d'eau du SMG sont représentées par les couleurs standardisées.	87
Figure 53	Distribution d'amont en aval des valeurs de l'indice trophique selon Schmedtje et al. 1998 calculées à partir des communautés épilithiques et épipéliques de diatomées en 1963, 2005, 2008 et 2011. A gauche les cinq classes de qualité d'eau du SMG sont représentées par les couleurs standardisées.	89

Figure 54	Composition des peuplements de diatomées par groupes de résistance saprobique. En haut, communautés épilithiques donnant l'indication de la qualité saprobique des eaux de surface. En bas, communautés épipéliciques donnant l'indication de la qualité des eaux à l'interface eau/sédiment. Les classes de qualité sont données en chiffres romains de I à III selon le système de Liebmann 1958. Le trait noir relie les sommes des abondances relatives des groupes de diatomées indiquant le bon état écologique selon la loi suisse. L'objectif écologique est atteint (classes I et II) lorsque la somme de ces trois groupes forme au moins le 50% de la communauté de diatomées.	91
Figure 55	Lac de Moron La Roche, 30.6.2011, photo. M. Devaud.	95
Figure 56	Moulin du Saut, 30.6.2011, photo. M. Devaud.	95
Figure 57	Macroinvertébrés benthiques : Taeniopterygidae (Brachyptera risi), Plecoptère polluo-sensible (gauche) ; Physidae (Haitia acuta), Mollusque polluo-résistant (droite).	99
Figure 58	Evaluation des stations analysées à l'aide des SPEAR-Index. Indication de la qualité biologique de chaque station vis à vis de son exposition aux pesticides et autres substances toxiques.	106
Figure 59	Comparaison des relevés IBCH 2011 avec les données de Verneaux 1966-70 au lieu-dit « Les Graviers ».	110
Figure 60	Photos comparatives du Doubs au lieu-dit « Les Graviers ». Photos prises le 17.04.2011, à 12h17 à gauche et à 13h39 à droite.	111
Figure 61	Doubs, Les Graviers, 17.04.2011, Ponte de grenouille rousse mise à sec (gauche) et « encroûtement » caractéristique des substrats dans la zone de marnage à droite.	111
Figure 62	Populations d'ombres d'importance nationale: Distribution, zones principales, frayères, habitats larvaires. OFEV 2006.	114
Figure 63	Evaluation de la contribution (en %) de l'alevinage pour le secteur situé sur le Doubs franco-suisse entre le barrage de la Goule et la boucle jurassienne, cohorte par cohorte, (n) : taille de l'échantillon. D'après Champigneulle et al., 2002.	116
Figure 64	Structure du peuplement piscicole observé au niveau de la station du tronçon court-circuité du Châtelot (ONEMA, 2012). CHA : Chabot / TRF : Truite fario / VAI : Vairon / LOF : Loche franche / OBR : Ombre / CHE : Chevaine / GAR : Gardon / GOU : Goujon / VAN : Vandoise.	120
Figure 65	Densités numériques et pondérales de truites sur la station de « Chez Némorin ».	121
Figure 66	Classes de taille des truites échantillonnées au niveau de la station de « Chez Némorin ».	121
Figure 67	Abondances relatives, comparaison 2004 - 2011.	122
Figure 68	Truites de rivière - effectifs bruts à l'hectare par classes de taille.	123
Figure 69	Comparaison des croissances moyennes rétrocalculées.	124
Figure 70	Comparaison, par station d'amont en aval, des croissances moyennes rétrocalculées.	124
Figure 71	Relation entre la concentration, la fréquence, l'intensité, d'une contrainte et la durée d'exposition pendant un événement (modifié d'après Vladimir, 2005).	126
Figure 72	Les effets de huit composés oestrogéniques ont été évalués individuellement (1 à 8). La somme des effets ainsi déterminés fait état d'un potentiel oestrogénique (AE = addition des effets) nettement plus faible que celui d'un mélange des huit substances déterminé expérimentalement (MIX). Si on applique le principe de l'addition des concentrations (AC), l'effet calculé atteint le niveau expérimental (modifié d'après Silva et al., 2002).	127
Figure 73	Relation entre les facteurs de stress et la mortalité piscicole (AQUARIUS 2010).	127
Figure 74	Plages de températures idéales pour le développement optimal des espèces de truites, ainsi que limites de température maximale en été (T1: 25 °C), température moyenne journalière tolérable (22 °C) et température maximale hivernale (12 °C).	131
Figure 75	Température de survie de jeunes salmonidés (entre 1 et 3 ans) pour différentes températures d'acclimatation (10, 15, 20, 24°C) en fonction de la durée d'exposition.	132
Figure 76	Influence d'une augmentation de température sur les invertébrés. L'«activité» des invertébrés est évaluée sur la base du nombre d'individu visible.	132
Figure 77	Profils marginaux de probabilité de présence, pour chaque espèce, en fonction des températures estivales. En rouge : Erreurs de prédictions. En orange : Intervalles de confiance.	133
Figure 78	A gauche, aperçu d'une turbine de type Kaplan vue de dessus et profil en travers. A droite, pression dans une turbine Kaplan. Tracé de la pression de l'eau (ligne continue) et vitesse du courant (ligne discontinue) par la turbine depuis l'entrée de la centrale jusqu'à la sortie en aval. Adapté d'après (Monten, 1985).	136

Liste des tableaux

Tableau 1	Synthèse des obstacles qui fragmentent le continuum biologique sur le Doubs neuchâtelois.	20
Tableau 2	Stations de suivi systématique de la qualité des eaux de surface du Doubs bassin neuchâtelois.	21
Tableau 3	Caractéristiques comparatives des 3 installations du Doubs franco-suisse fonctionnant par éclusées. Précisons qu'actuellement, la Goule fonctionne quasiment comme une centrale au fil de l'eau en raison notamment de l'envasement de sa retenue.	29
Tableau 4	Données techniques de l'usine du Châtelot et de sa turbine de dotation.	31

Tableau 5	Synthèse des modifications positives apportées par les Forces motrices du Châtelot sur l'hydrologie du Doubs franco-suisse (adapté de Groupe E SA, 2011).	34
Tableau 6	Tableau récapitulatif des changements importants survenus entre 1994 et 2006 en relation avec les usines du Châtelot, du Refrain et de la Goule. Précisons que dès 2004 et jusqu'en 2008, l'engagement des groupes a été fait par la société Avenir, filiale d'EOS. Groupe E a repris cette activité en août 2008.	35
Tableau 7	Synthèse des résultats de l'évaluation HYDMOD par tronçon (BG, 2011).	41
Tableau 8	Rendements et rejets moyens pour les années 2010 et 2011. Les chiffres présentés dans ce tableau sont tirés des analyses en autocontrôle, plus nombreuses que les analyses cantonales, à l'exception du COD, qui n'est pas demandé aux STEP pour l'autocontrôle et qui est donc tiré des analyses du service cantonal de l'énergie et de l'environnement (SENE). Habitants raccordés : 37'580 (en 2010) / Débit moyen 2010: 15'159 m ³ /j / Débit moyen 2011: 14'069 m ³ /j.	50
Tableau 9	Les chiffres sont tirés des analyses en autocontrôle, plus nombreuses que les analyses cantonales, à l'exception du COD, qui n'est pas demandé aux STEP pour l'autocontrôle et qui est donc tiré des analyses du service cantonal de l'énergie et de l'environnement (SENE). Habitants raccordés : 10'052 (en 2010) / Débit moyen 2010: 7'638 m ³ /j / Débit moyen 2011: 5'828 m ³ /j.	52
Tableau 10	Les chiffres sont tirés des analyses en autocontrôle, plus nombreuses que les analyses cantonales, à l'exception du COD, qui n'est pas demandé aux STEP pour l'autocontrôle et qui est donc tiré des analyses du service cantonal de l'énergie et de l'environnement (SENE). Les chiffres 2011 sont tirés des analyses effectuées par le SENE, les chiffres de l'autocontrôle n'étant pas encore disponibles. Habitants raccordés : 1'200 (en 2010) / Débit moyen 2010 : 507m ³ /j / Débit moyen 2011 : 379m ³ /j.	53
Tableau 11	Liste des paramètres contrôlés systématiquement sur les stations de suivi.	55
Tableau 12	Synthèse des échantillonnages réalisés sur le Doubs Neuchâtelois.	55
Tableau 13	Extrait du réseau de contrôle de surveillance de l'état qualitatif des eaux de surface. Informations fournies par le Système d'Information sur l'Eau (SIE) du bassin Rhône-Méditerranée.	57
Tableau 14	Synthèse des pesticides identifiés dans le Doubs lors des analyses effectuées entre 2000 et 2011. Seules les valeurs maximales mesurées sont présentées. Attention, l'absence de résultat peut découler de l'absence d'analyse. Les valeurs dépassant le seuil de l'OEaux sont soulignées en rouge.	70
Tableau 15	Synthèse des analyses des sédiments réalisées par la France.	71
Tableau 16	Synthèse des analyses des sédiments réalisées par le SENE en 2011, partie 1.	72
Tableau 17	Synthèse des analyses des sédiments réalisées par le SENE en 2011, partie 2.	72
Tableau 18	Proposition d'évaluation de la contamination des sédiments selon différents critères de référence.	72
Tableau 19	Stations de prélèvement des diatomées sur des galets, destinées au diagnostic des eaux courantes ou modérément stagnantes de surface. Les prélèvements correspondent aux méthodes de la norme suisse pour l'étude des rivières (SMG, Système modulaire intégré de la Confédération). Prélèvements étudiés	77
Tableau 20	Stations de prélèvement des diatomées et des cyanobactéries (algues bleues) à la surface des sédiments des retenues destinées au diagnostic de la qualité des interfaces eau/sédiment. Ces prélèvements ne correspondent à aucune méthode normalisée. Prélèvements étudiés	78
Tableau 21	Cyanobactéries trouvées à la surface des sédiments en 2011. Indications d'abondance : * = présent à 1 ou 2 individus, ** = moyennement abondant avec 3 à 20 individus, *** abondant avec 21 à 100 individus.	93
Tableau 22	Diagnostic Doubs, liste des stations examinées dans le Doubs et ses affluents.	99
Tableau 23	Relevés du macrozoobenthos effectués entre 1993-2010 dans le bassin versant du Doubs.	100
Tableau 24	Fenêtres d'échantillonnage prioritaires en fonction de l'altitude selon Stucki, 2010.	101
Tableau 25	Classes de qualité de base de l'IBGN selon la norme AFNOR NF T 90-350 reprise par l'IBCH (Stucki, P. 2010).	102
Tableau 26	IBCH, résultats synthétiques par station de cours d'eau. Classes de qualité biologique : I très bonne (bleu), II bonne (vert), III passable (jaune), IV mauvaise (orange), V très mauvaise (rouge).	105
Tableau 27	Evaluation des stations analysées à l'aide des SPEAR-Index. Indication de la qualité biologique de chaque station vis à vis de son exposition aux pesticides et autres substances toxiques. Comparaison avec les indices IBCH obtenus.	106
Tableau 28	Listes rouges (Lubini et al., année 2012), résultats détaillés par station de cours d'eau. Abondances exprimées en nombre d'individus déterminables pour 0.5 m ²	108
Tableau 29	Liste taxonomique des espèces de poissons présentes dans le Doubs lentique et lotique selon la base de données actualisée des poissons et cyclostomes de Suisse. Les noms scientifiques correspondent à la nouvelle nomenclature proposée pour la mise à jour de l'Ordonnance relative à la loi fédérale sur la pêche (OLFP) du 24 novembre 1993 (Etat le 1er juillet 2009).	113
Tableau 30	Effectifs & abondances par espèce. Comparaison 2004 - 2011.	122
Tableau 31	Dénombrement des frayères mises à sec lors de opérations de turbinage par écluses du Chatelot (D'après Riegler K., 1986). L'auteur de l'étude conclut que sur les 3 km à l'aval de l'usine du Torrent, au moins 25% des œufs pondus ont été perdus pour la rivière lors des observations.	128

1. INTRODUCTION – CADRE

La qualité des eaux du Doubs et l'état de ses biocénoses font actuellement l'objet de grandes préoccupations. Celles-ci se sont accentuées suite notamment à des mortalités piscicoles d'ampleurs non négligeables survenues depuis 2009.

Au cours de cette période, les stations de suivi systématique de quelques indicateurs courants de la qualité des eaux du bassin du Doubs neuchâtelois n'ont pas mis en évidence de dégradations flagrantes ou de pollution majeure. Relevons que des phénomènes analogues proches ou similaires ont également été observés dans plusieurs cours d'eau franc-comtois telle que la Loue par exemple.

Des mortalités piscicoles sont périodiquement observées et archivées depuis les années 60 dans le Doubs, en particulier lors de périodes subissant des déficits hydriques marqués. Néanmoins, bien conscientes de l'ampleur des mortalités observées entre 2009 et 2011 ainsi que de l'interaction multifactorielle complexe de perturbateurs difficiles à apprécier dans leur globalité, les autorités cantonales ont décidé de réaliser des campagnes d'analyses complémentaires, conjointement et en collaboration avec le canton du Jura et les autorités françaises.

Pour ce faire, le Service de l'énergie et de l'environnement, ci-après SENE, a mandaté pour la partie neuchâteloise un groupe de travail constitué de spécialistes expérimentés dans les domaines des écosystèmes aquatiques pour réaliser un diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface du bassin neuchâtelois. Le groupement en question est composé de :

- > Aquarius qui s'est chargé de la coordination générale, de l'analyse des différents paramètres hydrologiques, de l'interprétation des analyses chimiques, des aspects relatifs à la faune piscicole et qui a procédé à la rédaction du rapport de synthèse. Aquarius a également procédé aux prélèvements de sédiments en profondeur.
- > Aquabug s'est chargé de tous les aspects liés aux invertébrés aquatiques. PhycoEco s'est occupé des aspects liés à l'analyse et l'appréciation du périphyton.
- > Le SENE a effectué la coordination des analyses de la qualité des eaux, des sédiments, et autres analyses écotoxicologiques. Il s'est également chargé de la rédaction du chapitre touchant à l'épuration des eaux usées.
- > La section faune du Service de la faune, des forêts et de la nature (SFFN) a réalisé les pêches à l'électricité ainsi que les prélèvements de poissons.

Ce sont ainsi de multiples campagnes de terrains qui se sont succédées entre 2010 et 2011 pour collecter un maximum de données concernant les différents compartiments de l'écosystème « Doubs neuchâtelois » dans le but de dresser un diagnostic. Les données recueillies ont été utilisées comme outil d'appréciation ou/et comme point de comparaison avec des références antérieures. Les résultats sont synthétisés et analysés dans le présent rapport. Les données des investigations jurassiennes et françaises, dans un esprit constructif d'échange réciproque d'informations, ont été largement consultées et intégrées.

Dans la mesure du possible, certaines interprétations ou hypothèses ont également été formulées sur la base de la littérature scientifique disponible.

2. OBJECTIFS

Les objectifs principaux et particuliers du présent rapport sont les suivants :

- Coordonner et assurer la cohérence des différentes campagnes de terrain 2010/2011 sur le bassin du Doubs neuchâtelois.
 - > Définir le choix des indicateurs biotiques et abiotiques.
 - > Coordonner et vérifier la pertinence des stations retenues pour le diagnostic.
 - > Réaliser des campagnes d'échantillonnage.
- Rassembler, compiler et analyser les données existantes.
 - > Faire la synthèse des recherches 2010/2011 concernant la qualité des eaux du bassin du Doubs neuchâtelois.
 - > Analyser les données des campagnes 2010/2011.
 - > Intégrer le mieux possible les données antérieures.
 - > Prendre en considération les paramètres hydrologiques.
 - > Prendre en considération les études réalisées sur le canton du Jura et la France voisine.
- Réaliser une étude pluridisciplinaire permettant de poser un diagnostic de l'état du Doubs franco-neuchâtelois.
 - > Produire un rapport prioritairement axé sur le Doubs s'appuyant sur une analyse à l'échelle du bassin d'alimentation neuchâtelois et prenant en compte les résultats des études effectuées sur la partie française.
 - > Dresser une évaluation objective et scientifique de l'état actuel du Doubs.
 - > Comparer dans la mesure du possible les données actuelles avec des données antérieures.

3. DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE

En Suisse, le suivi de la qualité chimique et biologique des cours d'eau est de manière générale une mission assurée par les cantons. La notion de suivi est relativement récente et n'a été mise en place de manière systématique sur le bassin du Doubs neuchâtelois que depuis le début des années 80 environ. Les efforts se sont au départ avant tout concentrés sur des critères chimiques au niveau des exutoires des stations d'épuration.

Le Doubs, sur ses parties suisse et franco-suisse est un cours d'eau à la morphologie globalement naturelle qui possède une biodiversité remarquable à l'échelle européenne et unique en Suisse. A l'heure actuelle, il apparaît que l'état du Doubs est préoccupant car de nombreuses biocénoses rares et menacées qui y vivent sont en régression et pour certaines au bord de l'extinction.

Les principales causes de cette dégradation ont déjà fait l'objet de plusieurs recherches et sont pour la plupart individuellement bien cernées. Des négociations et des actions ont d'ailleurs été menées depuis plus de 20 ans, conduisant notamment localement à la réduction des impacts des activités hydroélectriques par l'augmentation de débits résiduels ainsi qu'à l'assainissement de plusieurs rejets polluants.

Malgré ces progrès, des diagnostics plus récents montrent que la qualité globale du Doubs continue de se dégrader. Bien que l'augmentation récente des amplitudes des éclusées puisse l'expliquer en partie, il est aujourd'hui certain que l'action conjointe de nombreux autres facteurs engendre un effet probablement cumulatif important. L'incidence de ces interactions est extrêmement difficile à prévoir et à évaluer car elles varient sans cesse en fonction notamment des conditions hydrologiques. Les déficits hydriques cumulés de ces 3 dernières années sont à titre d'exemple exceptionnels (débits d'étiages prolongés, températures printanières et hivernales anormalement élevées, absence de crues, etc.) et ont assurément momentanément largement contribué à une diminution de la capacité autoépuratrice du Doubs ainsi qu'à des proliférations algales.

Les mortalités piscicoles inquiétantes des années 2010-2011 ont été un déclencheur qui a catalysé la volonté des autorités suisses et françaises de mener des investigations conjointes. La difficulté de cette démarche réside dans le choix des indicateurs et des méthodes reproductibles qui ne sont pas les mêmes d'un pays à l'autre et qui ne permettent souvent pas clairement ou précisément d'apprécier les facteurs perturbateurs individuellement. Précisons que certaines investigations sont très complexes à mettre en œuvre et nécessitent par exemple lors de pêches à l'électricité, plus de 30 opérateurs simultanément.

4. CONTEXTE ET POLITIQUE INTERNATIONALE

Le contexte binational du Doubs sur le tronçon neuchâtelois traité dans le présent rapport est une particularité qui explique le statut inhabituel du site et la nécessité d'effectuer une concertation internationale pour régler l'utilisation et la protection de ce cours d'eau. A cet effet, les gouvernements ont notamment mis en place sur la base de l'accord international du 29 juillet 1991, une " commission mixte " relative à l'exercice de la pêche et la protection du milieu aquatique.

Plus récemment, le Préfet de la Région Franche-Comté et le Sous-directeur de l'Office Fédéral Suisse de l'Environnement ont engagé le 12 mai 2011 à Besançon une dynamique d'action volontariste pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques du Doubs franco-suisse. Sous l'autorité des deux administrations nationales et dans le cadre des accords officiels existants entre les deux pays, un groupe de travail bilatéral constitué, pour la Suisse, des responsables des services fédéraux et cantonaux, et pour la France, des services et établissements publics de l'Etat, des collectivités régionale et départementale et de la Fédération de pêche, devra coordonner et affiner la connaissance des problèmes et établir des priorités d'actions qui devront mobiliser l'ensemble des acteurs. Un document-cadre pour le Doubs franco-suisse a ainsi été développé en janvier 2012 (cf. annexe AQ-1).

4.1 Au niveau Suisse

Du fait que les aménagements hydroélectriques sont situés sur le Doubs frontière et que le cours d'eau figure à plusieurs inventaires fédéraux, c'est à la fois les cantons et la Confédération qui assurent la planification et la mise en place des suivis, réglementations et assainissements sur territoire helvétique. La répartition précise des tâches n'est ici pas abordée car elle n'est pas réglée dans une procédure unique simple. Pour la Confédération, c'est le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) qui est responsable, essentiellement par :

- > L'Office fédéral de l'énergie (OFEN)
- > L'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Pour le canton de Neuchâtel, les services suivants sont les principaux concernés :

- > Service de l'énergie et de l'environnement (SENE)
- > Service de la faune, des forêts et de la nature (SFFN)

4.2 Au niveau Français

De l'autre côté de la frontière, la mise en œuvre de la politique de l'Etat français sous ses aspects réglementaires et techniques est assurée par :

- > les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL, ex-DRE, DRIRE, Diren), la DREAL Franche-Comté et la DREAL Rhône-Alpes
- > Les Directions Départementales des Territoires (DDT, ex- DDE, DDAF), en l'occurrence la DDT – Doubs

Au niveau national, le rôle particulier de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) est d'assurer la surveillance des milieux aquatiques et le contrôle des usages.

La responsabilité de la planification et de l'incitation financière à l'échelle du bassin concernée est assurée par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée. Son objectif est de contribuer à l'atteinte du bon état des eaux par la recherche de l'équilibre entre les ressources et les utilisations rationnelles de l'eau. Elle contribue à la définition et à la mise en œuvre de la stratégie nationale pour l'eau et les milieux aquatiques, en partenariat avec les services de l'Etat et l'ONEMA. Elle atteint ces objectifs par des interventions financières (redevances et aides), par la construction et le développement d'outils de planification (SDAGE, programme d'interventions, etc.) et par la production et la gestion de données sur l'eau. Auxquelles s'ajoutent des missions d'information du public pour soutenir la conduite participative et collective de la politique de l'eau.

L'Etablissement Public Territorial du Bassin (EPTB) Saône et Doubs est un Syndicat Mixte regroupant des régions, départements et agglomérations du bassin hydrographique de la Saône. Il a pour vocation de définir et impulser des projets et des programmes d'aménagement et de gestion dans les domaines des inondations, des milieux aquatiques, de la biodiversité et de la ressource en eau. Il réalise les études de faisabilité, d'avant projet de travaux, organise et assiste les maîtres d'ouvrage locaux et relaie ses collectivités adhérentes pour la mise en œuvre de leur politique.

5. BASSIN VERSANT

Affluent de la Saône, le Doubs prend sa source dans le Jura français, à Mouthe, à 937 mètres d'altitude. Serpenteant sur près de 460 km, il traverse les lacs de Saint-Point et des Brenets, d'où il sort par le Saut du Doubs avant de se jeter dans le lac de Moron, qui constitue le bassin de retenue du barrage du Châtelot. Achevé en 1953, ce dernier est l'un des trois ouvrages hydroélectriques du Doubs franco-suisse, suivi par le Refrain puis la Goule.

La délimitation du système d'analyse de la présente étude se concentre sur le bassin neuchâtelois du Doubs sans occulter toutefois les influences amonts et la boucle jurassienne de ce cours d'eau.

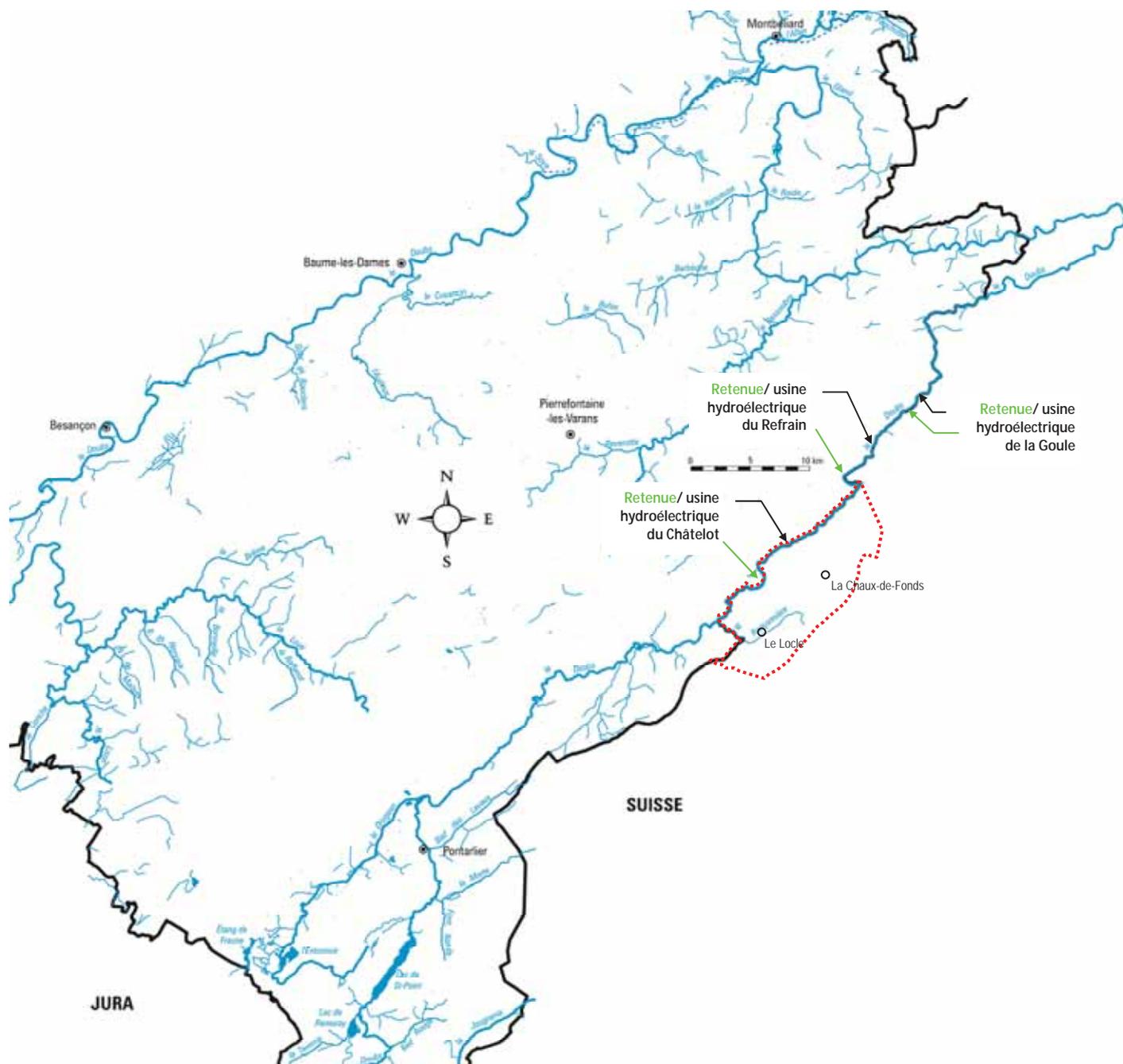
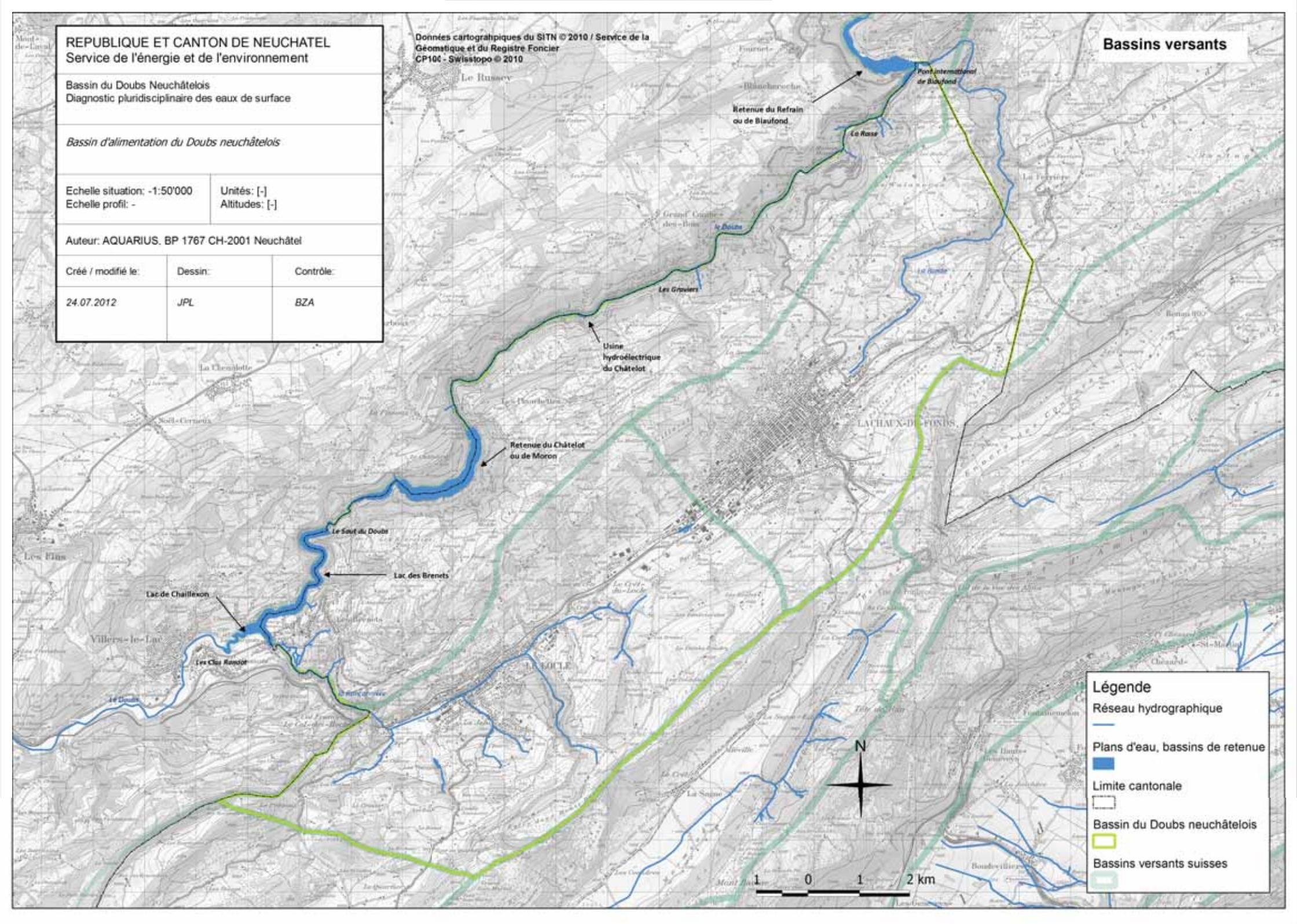
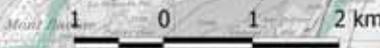


Figure 1 Extrait du réseau hydrographique du département du Doubs. En rouge figure le bassin du Doubs Neuchâtelois.



Légende

- Réseau hydrographique
- Plans d'eau, bassins de retenue
- Limite cantonale
- Bassin du Doubs neuchâtelois
- Bassins versants suisses



5.1 Historique – force hydraulique

Dans les Montagnes neuchâteloises, des petits moulins sont établis dès le Moyen Age au bord des ruisseaux (appelés biefs), notamment pour moudre le grain. Les premiers rouages sont construits près des villages, à La Sagne et au Locle (aux alentours de 1350), tandis que le premier moulin de la rive droite du Doubs est mis en service à proximité des Brenets, peut-être déjà au XVe siècle. Le nombre de petites usines hydrauliques augmente de manière spectaculaire dans les années 1600. Mais entre les risques de crues dévastatrices et d'éboulements, l'exploitation d'un moulin reste un travail dangereux. Vers 1660, on dénombre une trentaine de roues à aubes réparties sur une dizaine de sites sur la rive neuchâteloise, un peu moins sur la rive française. Ces roues actionnent des moulins bien entendu, mais également des scieries, des pressoirs à huile ou encore des forges essentiellement spécialisées dans la taillanderie (fabrication de lames). Des verreries s'implantent provisoirement au bord de la rivière, épuisent les ressources en arbres alentour pour faire chauffer des fours à plus de 1'000° C, puis se déplacent de quelques kilomètres pour profiter de la végétation abondante. La matière première est importée de loin car le sable de la rivière ne se prête pas à la vitrification. Le déclin s'amorce dès le dernier quart du XVIIIe siècle. Peu à peu, avec l'arrivée de l'énergie produite par la vapeur et la concentration des entreprises à proximité des voies de communication, le Doubs est déserté. Du côté suisse, deux moulins subsistent en 1875 (Moron amont et les Moulins Calame), mais ils ferment leurs portes vers 1880. En 1900, on ne dénombre plus que cinq usines aux abords des rives neuchâteloises. La dernière d'entre elles cesse son activité en 1938. Enfin, du côté français, la scierie de la Rasse est fermée vers 1956. L'exploitation hydroélectrique débute en 1894 à la Goule, en 1909 au Refrain et en 1930 au Châtelot (construction du barrage 1950-1953).

5.2 Bassin géographique et de population

Depuis sa source jusqu'à la frontière suisse, le Doubs parcourt approximativement 92 km et couvre un bassin de 934 km² pour environ 62'000 habitants. Les plus grandes agglomérations sont Pontarlier avec un peu moins de 19'000 habitants en 2007 et Morteau avec environ 6'400 habitants.

Le Doubs marque ensuite la frontière entre la Suisse et la France sur une distance d'environ 44 km. Sur ce linéaire, le bassin français du Doubs frontière est d'environ 200 km² pour approximativement 10'000 habitants. L'agglomération la plus peuplée de ce sous-bassin est Villers-le-Lac avec environ 4'300 habitants.

Le bassin du Doubs neuchâtelois concerne environ 18 km du Doubs. Le bassin d'alimentation est d'environ 116 km² et comprend approximativement 50'000 habitants dont la très grande majorité est regroupée dans les villes de la Chaux-de-Fonds (environ 37'400 habitants) et du Locle (environ 10'100 habitants).

A l'aval du canton de Neuchâtel, le Doubs longe puis traverse le canton du Jura sur une distance d'environ 57 kilomètres pour un bassin d'alimentation d'approximativement 235 km². Peuplé d'environ 10'000 habitants, la plus grande agglomération de ce sous-bassin est Saignelégier qui comptait en 2009 un peu plus de 2'500 habitants.

5.3 Couverture du sol

La couverture du sol est représentée sur la situation ci-après. On constate qu'en raison de la topographie engorgée du Doubs franco-neuchâtelois, très peu d'habitations se trouvent à proximité de la rivière.

Seule l'agglomération des Brenets se situe au droit immédiat du Doubs. La population de cette commune est d'un peu plus de 1'000 habitants.

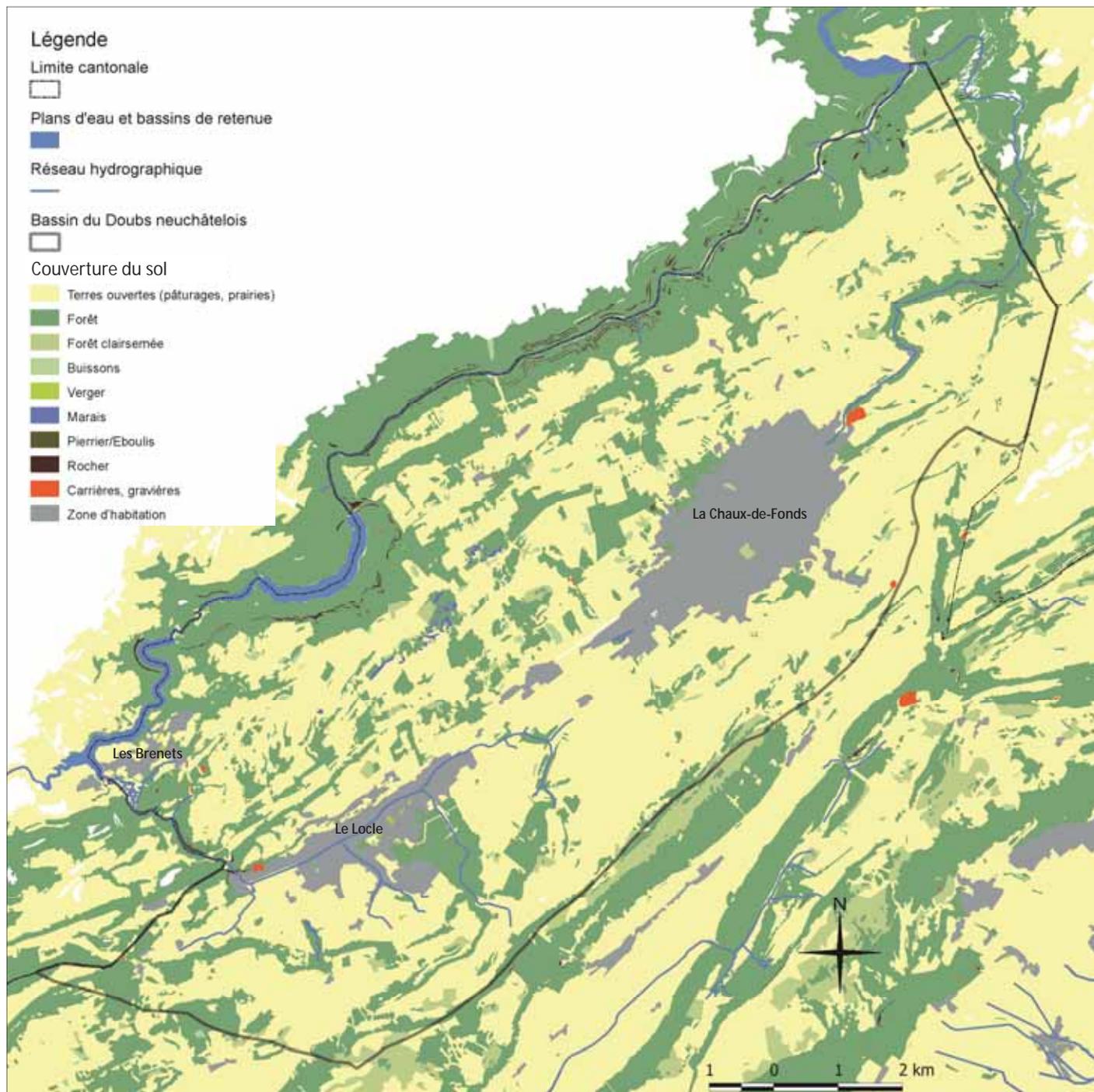


Figure 2 Couverture du sol (surfaces primaires - V25, d'après Swisstopo 2010).

5.4 Géologie – Karst

Le Doubs chemine dans les plateaux jurassiens puis le long de la haute chaîne communément appelée Jura Plissé. Cette morphologie, révèle des chevauchements et de grands plis asymétriques, généralement non cylindriques qui terminent en plongeant sous la surface et/ou en se relayant latéralement. Le segment étudié se situe dans le Jura Plissé, le Doubs « frontalier » chemine dans un pli concave (synclinal). L'action érosive de la rivière étant plus rapide que l'activité tectonique, le Doubs traverse par endroits les reliefs en formant une cluse, cela est visible en aval de Biaufond. Il chemine ensuite à nouveau dans un synclinal relativement plat, parallèlement à un chevauchement longeant la rive helvétique.

La surface topographique recoupe des terrains secondaires, depuis le Jurassique moyen jusqu'au Crétacé inférieur. Avec ses couches supérieures dans les synclinaux et ses couches inférieures flanquant les anticlinaux, le Malm domine la région autour du barrage du Châtelot. Le Dogger forme une voûte sur toute la chaîne de Poulllerel.

Les dépôts quaternaires sont représentés surtout par du lehm de décalcification, disséminé par plaques sur tout le territoire, mais de préférence aux altitudes moyennes, et par des éboulis au pied des escarpements tout le long du Doubs. Des tourbières, peu nombreuses et de surface restreinte, sont intéressantes par leur caractère particulier au point de vue de l'érosion karstique. Situées au sommet de la chaîne de « Poulllerel », dans sa partie sud-est, elles se trouvent entre 1220 et 1260 m s.m., au pâturage de Saignotte, près de la Ferme Modèle, à la Pâturage, au-dessus de Sagne Pendante, au Saignolet et chez Jean Colar.

La structure géologique est composée de nombreuses failles bouleversant les formes originales, suivant qu'elles se soient produites pendant les phases de plissement ou consécutivement à celles-ci.

La région est composée de roches essentiellement calcaires ou roches marno-calcaires conditionnant la présence d'eau. Ce système explique l'absence d'affluent direct important (hormis la Rançonnière) dans le Doubs qui est alimenté en bonne partie sur le tronçon neuchâtelois par des résurgences souterraines et des sources.

L'imperméable de l'Argovien et de l'Oxfordien, composés également de calcaires et de marno-calcaires épais de 150 à 200 m, est un écran peu perméable, qui sépare les horizons aquifères du Dogger et du Malm. La porosité efficace est au voisinage proche de zéro. En conséquence la perméabilité est estimée à des valeurs basses de 10^{-7} à 10^{-8} m/s, ce qui explique localement dans les agglomérations les difficultés rencontrées pour infiltrer les eaux claires. Par contre, au voisinage des accidents tectoniques importants, des perméabilités régionales non négligeables sont possibles.

Les calcaires du Séquanien, du Kimméridgien et du Portlandien représentent le réservoir du Malm d'une épaisseur de 400 m. Le réservoir, de loin le plus important de tout le Jura neuchâtelois, présente une porosité efficace estimée à 4.5 pour mille dans la partie supérieure des nappes. A l'échelle régionale la perméabilité peut être évaluée de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m/s.

Dans ce contexte karstique, il est intéressant de mentionner que la ville de la Chaux-de-Fonds ne disposait pas lors de son développement industriel des ressources en eau potable en quantité et qualité suffisantes pour sa population. Entre 1883 et 1886, des moyens importants et astucieux ont été mis en œuvre pour créer un système d'adduction entre les gorges de l'Areuse et la ville. La Chaux-de-Fonds est de ce fait aujourd'hui essentiellement alimentée en eau potable par les ressources aquifères des Gorges de l'Areuse. Ce sont par conséquent des eaux du bassin du Rhin qui sont consommées dans la plus grande ville du canton et qui repartent ensuite après avoir été utilisées et traitées dans le bassin du Rhône via des pertes à l'aval de la STEP de la Chaux-de-Fonds.

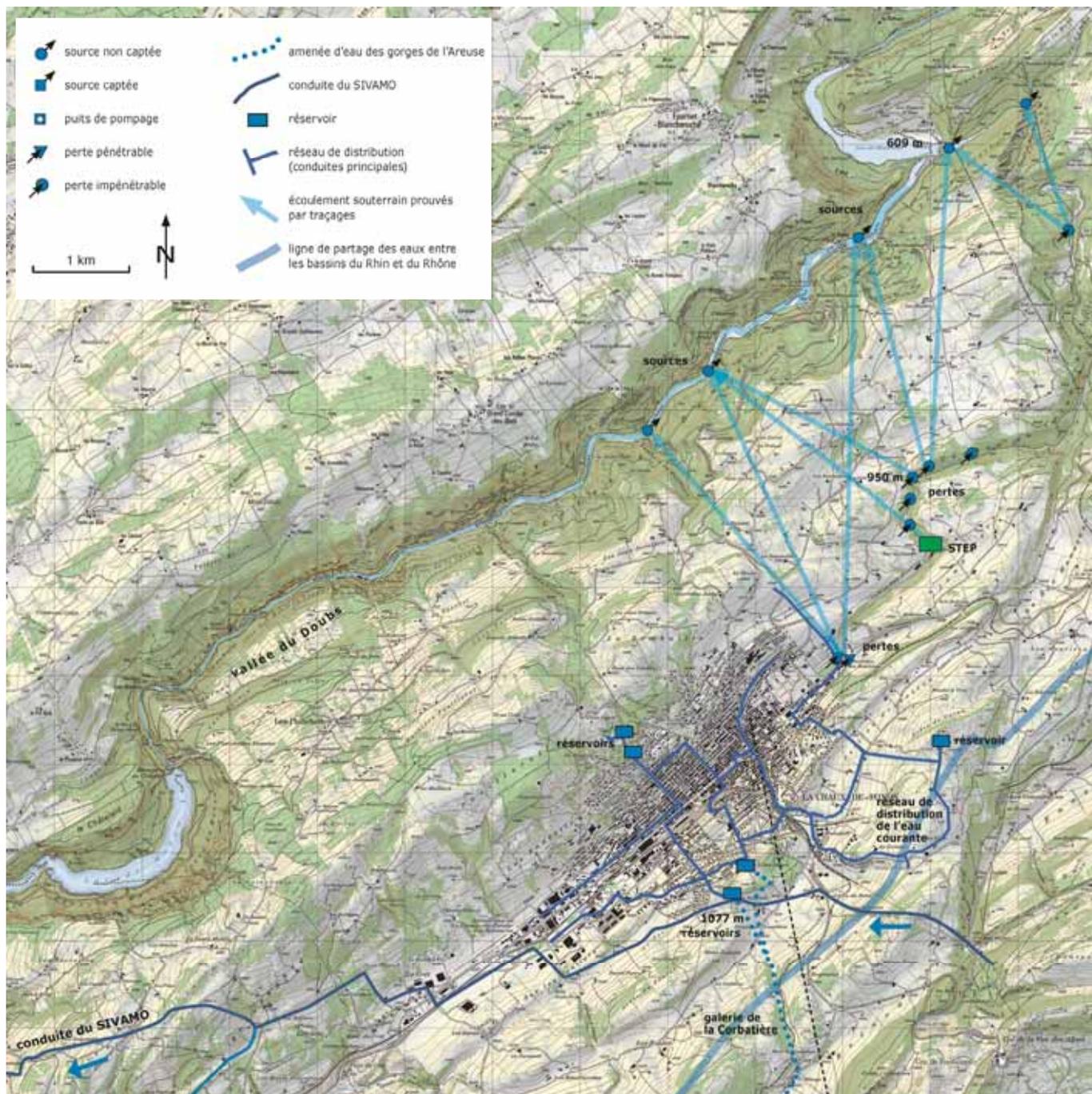


Figure 3 Extrait du parcours de l'eau d'alimentation de la Chaux-de-Fonds entre sa zone de captage et son rejet dans la nature. © Institut suisse de spéléologie et de karstologie, ISSKA 2008.

5.5 Sources polluantes d'origine anthropique

Ce chapitre ne vise pas à faire l'inventaire exhaustif des sources polluantes susceptibles d'affecter le Doubs mais plutôt à mettre en évidence les grands types de pollutions qui sont récurrentes et observées à l'échelle du bassin. Un diagnostic détaillé a été produit en 2011 par l'établissement public Saône et Doubs (EPTB, 2011) concernant l'origine des polluants.

5.5.1 Particularité et sensibilité du système karstique

Dans les régions karstiques, les cavités naturelles, dolines, dépressions et pertes de cours d'eau, ont été fréquemment utilisées comme lieux de décharge et de rejet d'eaux usées. Malgré la réglementation très stricte interdisant ces pratiques, des exemples récents montrent qu'elles ont encore cours. Il est en ce sens utile de préciser que ces cavités naturelles et les dépressions sont des points d'accès privilégiés aux réseaux de conduits karstiques, susceptibles de transférer plus ou moins rapidement dans les aquifères qui alimentent ensuite le Doubs. Les principaux marqueurs de pollutions identifiées dans le Doubs sont les suivants :

- > Pollution concentrée par des rejets d'effluents dans un cours d'eau drainé par des pertes karstiques, ou par des rejets directs dans des cavités. Il s'agit en particulier pour le bassin neuchâtelois du Doubs du cas de la Ronde, ancienne source dont le débit est aujourd'hui constitué en bonne partie par le rejet de la STEP de la Chaux-de-Fonds et les eaux claires de la ville par temps de pluie.
- > Pollution diffuse sur la surface karstique. Il s'agit essentiellement pour le bassin du Doubs neuchâtelois des activités agricoles.

Il faut également dans ce contexte souligner l'importante variabilité temporelle des réponses chimiques au travers des systèmes karstiques. Ce phénomène est la traduction dans le temps de l'hétérogénéité spatiale des conditions d'écoulement, qui se manifeste par des effets lointains à plusieurs kilomètres et par un comportement non linéaire : il n'existe pas de règle "concentration - distance", ni "concentration - débit", comme l'attestent entre autres les réponses des traçages.

5.5.2 Sources de pollutions des eaux superficielles

Les principales sources de pollution des eaux du Doubs sont (liste non exhaustive) :

- > Domestiques : N, Cl, B, (PO₄), bactéries et virus, perturbateurs endocriniens, micropolluants.
- > Agricoles et sylvicoles : N, (Cl), (PO₄), carbone organique dissous (COD) et carbone organique particulaire (COP) supports de développement bactérien, biocides, bactéries.
- > Industrielles et urbaines (conventionnellement pour certaines substances après dispositifs de traitement des eaux) : solvants (traitements de surface, laveries etc.), métaux lourds, hydrocarbures (généralement peu ou non mobilisables), produits phytosanitaires, Cl (salage) favorisant la mobilisation de certains polluants, etc..

La figure ci-après illustre les principales sources de pollutions recensées à l'échelle du bassin du Haut-Doubs.

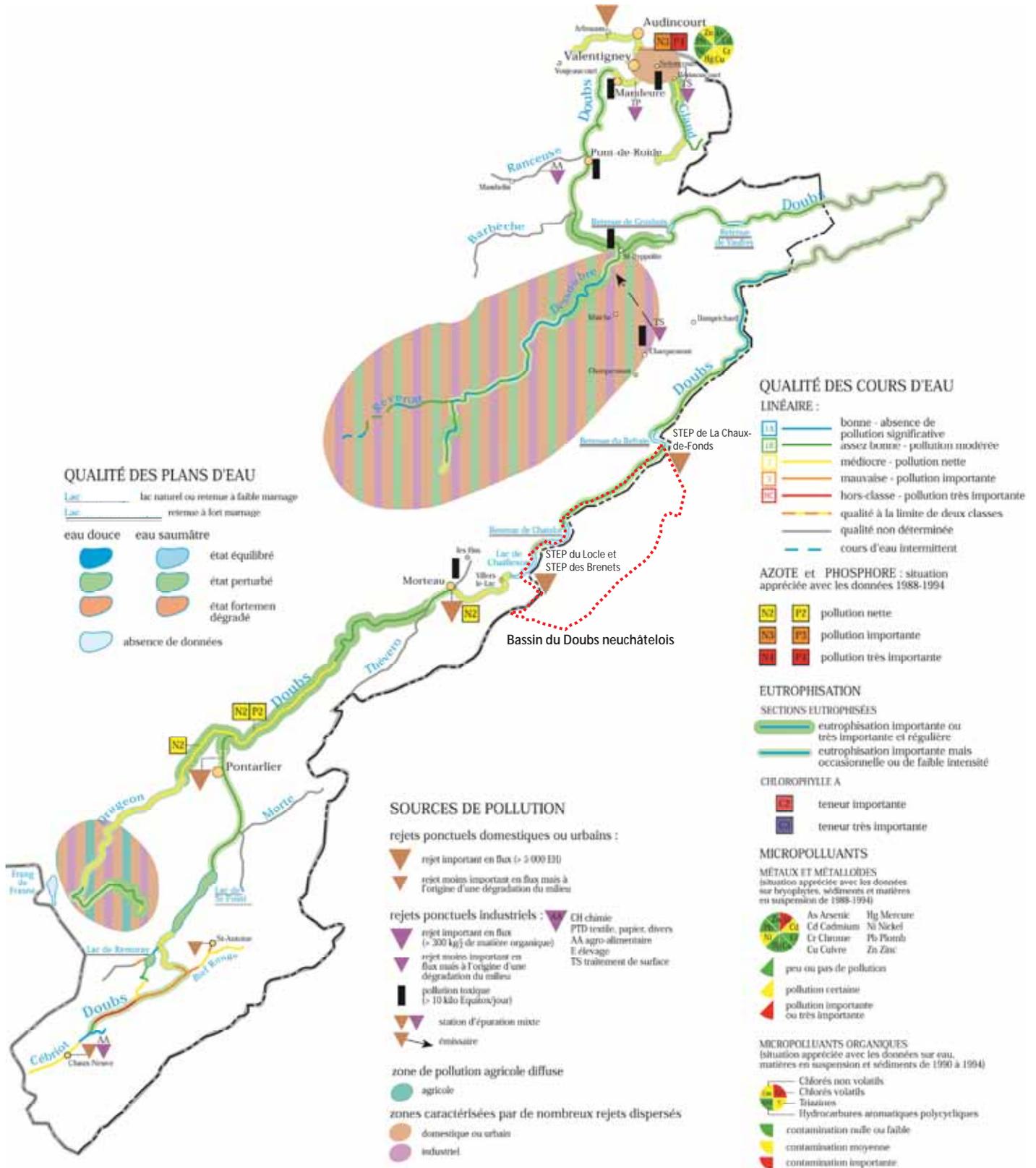


Figure 4 Extrait adapté de la qualité des eaux superficielles et sources de pollution – Haut-Doubs. Comité de bassin RMC, 1995. Complété par AQUARIUS, 2011.

5.6 Usines hydroélectriques

La description des installations hydroélectrique sur le Doubs franco-suisse fait est décrite aux chapitres « 6.1 Régime hydrologique du Doubs » et « 6.2 Perturbation du régime hydrologique du Doubs ». La carte ci-après synthétise l'exploitation hydroélectrique effectuée à l'échelle du bassin du Haut-Doubs.

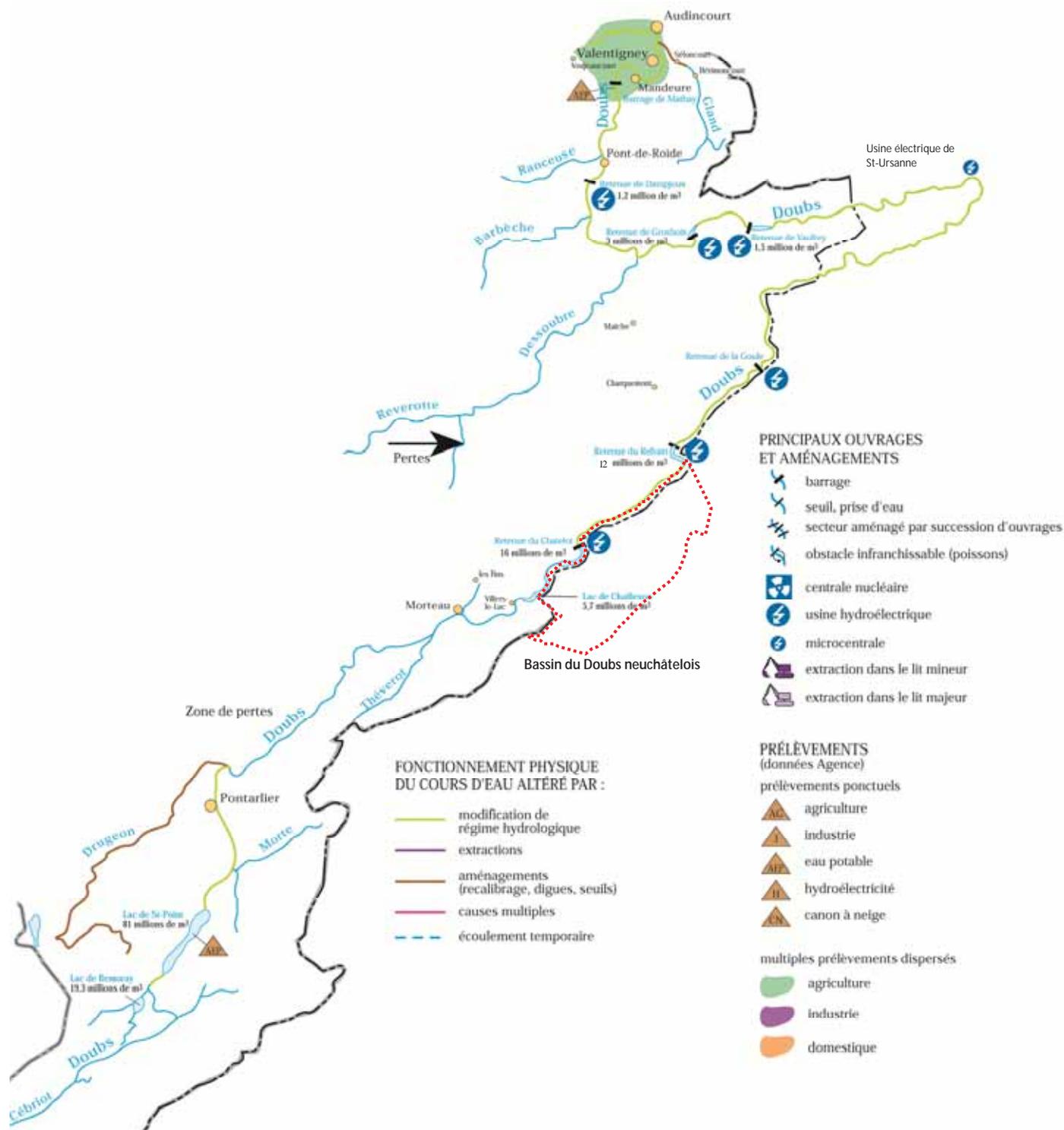


Figure 5 Extrait adapté de : *État physique des milieux aquatiques superficiels - Origine des perturbations, Haut-Doubs. Comité de bassin RMC, 1995. Complété par AQUARIUS, 2011.*

5.7 Ecomorphologie – connectivité

De manière générale, le Doubs Neuchâtelois se situe dans la classe des cours d'eau naturels à l'écomorphologie très peu atteinte. Les ouvrages hydroélectriques ainsi que les constructions ponctuelles autour des plans d'eau et bassins de retenue constituent l'essentiel des ouvrages construits.

Toutefois la fragmentation longitudinale de l'hydrosystème du Doubs représente à l'échelle du Doubs suisse et franco-suisse un impact général important pour les déplacements des biocénoses aquatiques. Cette fragmentation remonte à au moins plusieurs dizaines d'années. Aucune dégradation significative n'est survenue ces 20 dernières années. Précisons que le seuil qui était situé au niveau de l'usine de turbinage du Châtelot a été assaini dernièrement.

Lors de périodes de hautes eaux, certains poissons bons nageurs, telle la truite de rivière par exemple, sont capables de remonter en amont de certains obstacles (par exemple les seuils de la Rasse). Les poissons à faibles capacités natatoires, tel que le chabot, sont en revanche totalement incapables de franchir ces obstacles.

Le comportement des poissons et leurs aptitudes natatoires lors de leurs déplacements et migrations sont très variables : Certaines espèces ont des exigences quelques fois contradictoires à savoir par exemple que la truite de rivière, bonne nageuse, effectue ses principales migrations de reproduction entre octobre et janvier lors de période de hautes eaux. D'autres espèces migrent plutôt au printemps, comme l'ombre de rivière ou durant la période estivale pour bon nombre de cyprinidés.

Les obstacles à la libre circulation piscicole sur le Doubs neuchâtelois ont déjà fait l'objet de plusieurs études, ils ont notamment été recensés et décrits dans une base de données cantonale. Un rappel synthétique est donné dans le tableau ci-dessous, de l'amont vers l'aval.

Nom	Coordonnées	Origine	Franchissabilité piscicole
Saut du Doubs	544'971 / 215'372	naturelle	totalemment infranchissable
Barrage du Châtelot	547'343 / 216'913	artificielle	totalemment infranchissable
Contre seuil du Châtelot	547'283 / 216'983	artificielle	totalemment infranchissable
Aval barrage Châtelot	547'074 / 217'301	artificielle	franchissable par certains bon nageurs dans certaines conditions de débits
Rasse amont pont	554'826 / 222'792	artificielle	franchissable par certains bon nageurs dans certaines conditions de débits
Rasse aval pont	554'982 / 222'855	artificielle	franchissable par certains bon nageurs dans certaines conditions de débits

Tableau 1 Synthèse des obstacles qui fragmentent le continuum biologique sur le Doubs neuchâtelois.

5.8 Réseaux de suivi

En sus des analyses effectuées dans le cadre de chantiers ou suspicion de pollution par exemple, le canton de Neuchâtel dispose d'un réseau de stations de suivi de la qualité des eaux de surface qui inclut le bassin du Doubs. Plusieurs indicateurs physico-chimiques et biologiques sont actuellement régulièrement analysés.

Ce réseau de stations a été renforcé en 2010 et 2011, notamment concernant les analyses sédimentologiques et les indicateurs biologiques (Tableau ci-dessous).

Cours d'eau	Coordon_X	Coordon_Y	Physico-chimie de l'eau	Physico-chimie des sédiments	IBGN ou/et IBCH	Péryphyton
Bied du Locle 1	545790	211150	✓			
Bied du Locle 2	546485	211425	✓		✓	
Bied du Locle 3	546700	211525			✓	✓
Bied du Locle 4	546720	211550			✓	
Doubs 1	542680	212600	✓			✓
Doubs 2	542841	212964		✓		✓
Doubs 3	543451	212881		✓		✓
Doubs 4	544470	214939		✓		
Doubs 5	544983	215320	✓			
Doubs 6	545720	215732		✓		✓
Doubs 7	547515	216607		✓		✓
Doubs 8	553734	221911		✓		✓
Doubs 9	554784	222788		✓		
Doubs 10	554830	222820	✓			
Doubs 11	555060	222896	✓			✓
Doubs 12	555820	223922		✓		✓
Doubs 13	555980	223850		✓		✓
Doubs 14	555990	223850	✓			
Doubs 15	557170	226420	✓			✓
Doubs 16	544983	215320			✓	
Doubs 17	549042	219095			✓	
Doubs 18	549063	219113			✓	
Doubs 19	549845	219260			✓	
Doubs 20	551520	219980			✓	
Doubs 21	554830	222820			✓	
Doubs 22	555060	222896			✓	
Doubs 23	557170	226420			✓	
Rançonnière 1	543522	212777			✓	✓
Rançonnière 2	545000	211581			✓	
Rançonnière 3	543520	212775	✓			✓
Rançonnière 4	545000	211581	✓			
Ronde 1	555780	220200	✓		✓	✓
Ronde 2	556100	223990	✓			✓
Ruisseau Combe des Enfers	549050	213176	✓		✓	
Ruisseau de la combe Girard	548500	212545	✓		✓	
Ruisseau des Combes	545610	210650	✓		✓	

Tableau 2 Stations de suivi systématique de la qualité des eaux de surface du Doubs bassin neuchâtelois.

Une situation des stations ayant fait l'objet d'analyses entre 1993 et 2011 et prises en compte dans le présent rapport est présentée ci-après.

REPUBLIQUE ET CANTON DE NEUCHÂTEL
Service de l'énergie et de l'environnement

Bassin du Doubs Neuchâtelois
Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface

Trame d'échantillonnage

Echelle situation: -1:50'000
Echelle profil: -

Unités: [-]
Altitudes: [-]

Auteur: AQUARIUS. BP 1767 CH-2001 Neuchâtel

Créé / modifié le:

Dessin:

Contrôle:

09.03.2012

JPL

BZA

Données cartographiques du SITN © 2010 / Service de la
Géomatique et du Registre Foncier
CP100 - Swisstopo © 2010

Stations de mesures :
Réseau de stations

Légende

STEP, EqH

▲ 0 - 500

▲ 501 - 1000

▲ 1001 - 5000

▲ 5001 - 15000

▲ 15001 - 50000

Stations physico-chimie 1993-2011

✱ Physico-chimie de l'eau

✱ Physico-chimie des sédiments

Stations IBGN / IBCH 1993-2010

●

Station IBCH 2011

●

Stations périphyton

● Diatomées 2011

○ Diatomées historique 1963

○ Diatomées 1992 - 2010

◇ Cyanobactéries et autres algues 2003-2011

Réseau hydrographique

Plans d'eau, bassins de retenue

Limite cantonale

□

Bassin du Doubs Neuchâtelois

■

■

1 0 1 2 km

6. HYDROLOGIE

6.1 Régime hydrologique du Doubs

Dans la classification suisse, la régionalisation des régimes hydrologiques a été réalisée suite à l'étude de 95 bassins représentatifs choisis dans les réseaux fédéral et cantonal, suivant des critères bien définis : régime d'écoulement naturel, avec des séries de mesures homogènes sur plusieurs années, une surface comprise entre 10 et 500 km², et écoulements non influencés par des grands lacs. Dans le secteur d'étude le régime du Doubs est naturellement, comme le montre la figure ci-après, de type nivo-pluvial jurassien. Ce régime est notamment caractérisé par deux maxima, l'un assez prononcé vers avril-mai à la fonte des neiges, et l'autre plus modéré en automne (vers novembre, cela dépend des pluies tombées en automne). L'étiage survient assez régulièrement durant la période estivale. Les variations d'une année à l'autre pouvant être importantes.

Cependant, le régime du Doubs est depuis plusieurs dizaines d'années influencé par la présence d'installations hydroélectriques utilisant de grands bassins d'accumulation pour la production d'énergie de pointe. Il s'agit essentiellement des usines du Châtelot, du Refrain, et de la Goule dont les fonctionnements sont régis par un règlement d'eau général (cf. annexe 1). C'est la raison pour laquelle, dans l'Atlas hydrologique de Suisse, aucun régime hydrologique n'est attribué au Doubs suisse et franco-suisse.

Dans le cas du Doubs, les bassins d'accumulation ont essentiellement pour but de produire chaque jour de l'énergie aux heures de pointe. Ainsi, lors des périodes de moyennes ou basses eaux, l'eau est la plupart du temps stockée dans la retenue, puis turbinée lorsque la demande en énergie est élevée. On désigne ce mode d'utilisation "exploitation par éclusées". Celui-ci entraîne dans le cours d'eau en aval de la restitution d'importantes variations de débit et de hauteurs d'eau et par là même d'importants changements dans l'extension des surfaces mouillées ainsi que dans les vitesses d'écoulement.



Figure 6 Les types de régime d'écoulement de la Suisse sont représentés au moyen des bassins de bilan de la Suisse. L'ordre des types de régime et des codes pour les types 11 et 12 se réfère au travail original d'Aschwanden et Weingartner (1985)¹.

¹ Aschwanden H. und Weingartner R., 1985: Die Abflussregimes der Schweiz. Geographisches Institut der Universität Bern. Publikation Gewässerkunde Nr. 65.

6.1.1 Stations de mesure hydrologiques

Les débits du Doubs sont actuellement suivis en continu par la Division hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sur plusieurs stations de mesures hydrométriques. Celles qui se trouvent dans et à proximité du périmètre d'étude sont : Le lac des Brenets (LH2247), La Combe des Sarrasins (LH2270) et La Goule (LH2370). Elles sont représentées sur la situation ci-après.

Les niveaux d'eau à l'aval du barrage du Châtelot ainsi que sur la retenue de Biaufond sont également suivis en continu par des stations de mesures fédérales.

Précisons également qu'une station provisoire a été installée et exploitée entre 1992 et 1993 au lieu-dit « Pont de la Rasse » à l'aval de l'usine hydroélectrique du Châtelot par la DIREN Franche-Comté.

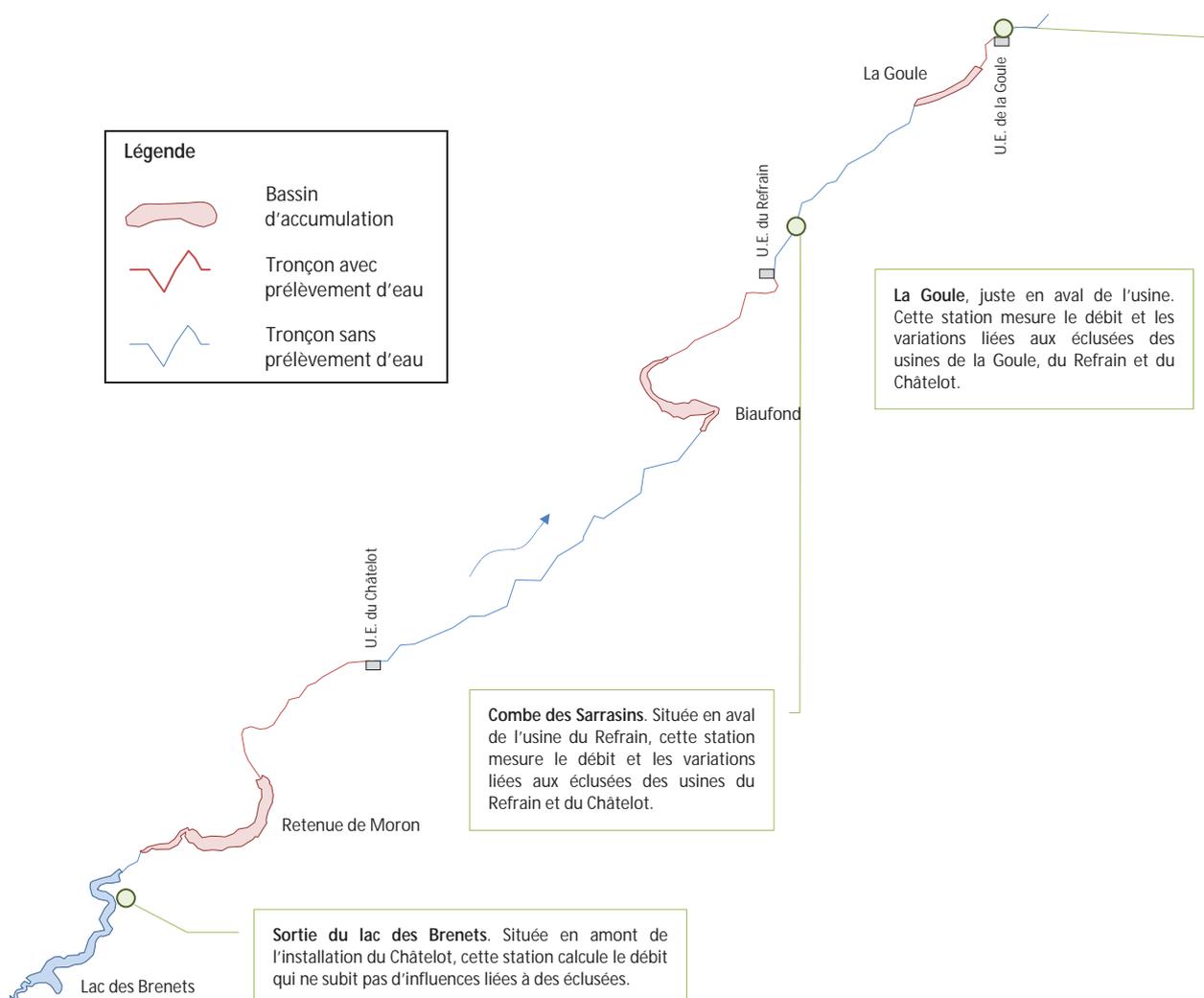


Figure 7 Situation des stations de mesures hydrologiques gérées par la Division hydrologie de l'OFEV.

6.1.2 Evènements extrêmes

Le suivi des évènements extrêmes se réfère aux données des stations hydrologiques décrites au chapitre précédent ainsi qu'à l'analyse réalisée par Jean-Claude Bouvier (1989)². Il porte essentiellement sur le lieu-dit « Combe des Sarrasins » mais traite également pour les données plus anciennes d'observations et de mesures effectuées sur la boucle jurassienne du Doubs.

6.1.2.1 Basses eaux

Des périodes de basses eaux particulièrement marquées ont été relevées durant les années : 1893, 1906, 1911, 1921, 1938, 1947, 1962, 1976 et 1985. En 1906 et 1962, le débit était quasiment nul à la Combe des Sarrasins.

Les années 2003, 2009 ainsi que 2011 constituent les années de basses eaux les plus marquées de ces dix dernières années.

6.1.2.2 Hautes eaux

Les statistiques de crues issues des données collectées depuis 1949 sur les stations fédérales de mesures montrent que les crues les plus importantes ont eut lieu en 1955, 1957 et 1990 avec respectivement 350, 350 et 360 m³/s, ce qui correspond approximativement à des crues avec un temps de retour de 50 ans.

Pour les données antérieures, des estimations ont pu être réalisées, notamment sur la base de l'interprétation du niveau d'eau atteint au pont de St-Ursanne (construction inchangée depuis 1729) et au pont de Soubey ainsi que sur les premières séries de mesures limnimétriques (1915). Ainsi, des débits de crues égaux ou supérieurs à 350 m³/s (approximations) ont été constatés dans les années 1882, 1896, 1899, 1910, 1918, 1919 et 1944. La crue de 1882 était estimée à 460 m³/s, débit supérieur à la crue centennale.

6.1.3 Aperçu et analyse des dernières années

Les conditions hydrologiques sont un des principaux facteurs qui influencent l'écologie d'un cours d'eau. L'importance du régime d'écoulement pour l'écologie aquatique réside dans le maintien des milieux naturels aquatiques ainsi que dans la préservation d'un régime de charriage proche de l'état naturel.

Le régime d'écoulement agit directement sur la taille de l'habitat aquatique en déterminant la largeur du cours d'eau et la profondeur de l'eau. La vitesse d'écoulement est un facteur de stress hydraulique. Le comportement hydrologique influence aussi indirectement le régime des matières solides (charriage et matières en suspension) et, par conséquent, la morphologie de l'habitat ainsi que le régime des températures.

² BOUVIER J.C., 1989. Essai sur le régime hydrologique du Doubs. Actes de la Société jurassienne d'émulation. Office des eaux et de la protection de la nature du Canton du Jura, St-Ursanne, Suisse, 19 p.

Ce chapitre a pour but de présenter, sur la période étudiée (entre 1973 et 2011, selon les données disponibles), les caractéristiques hydrologiques du Doubs selon une approche synthétique et globale. Celle-ci vise à donner une vue d'ensemble des conditions et particularités hydrologiques rencontrées durant ces dernières années et plus particulièrement durant les périodes où des investigations hydrobiologiques et physico-chimiques ont été menées.

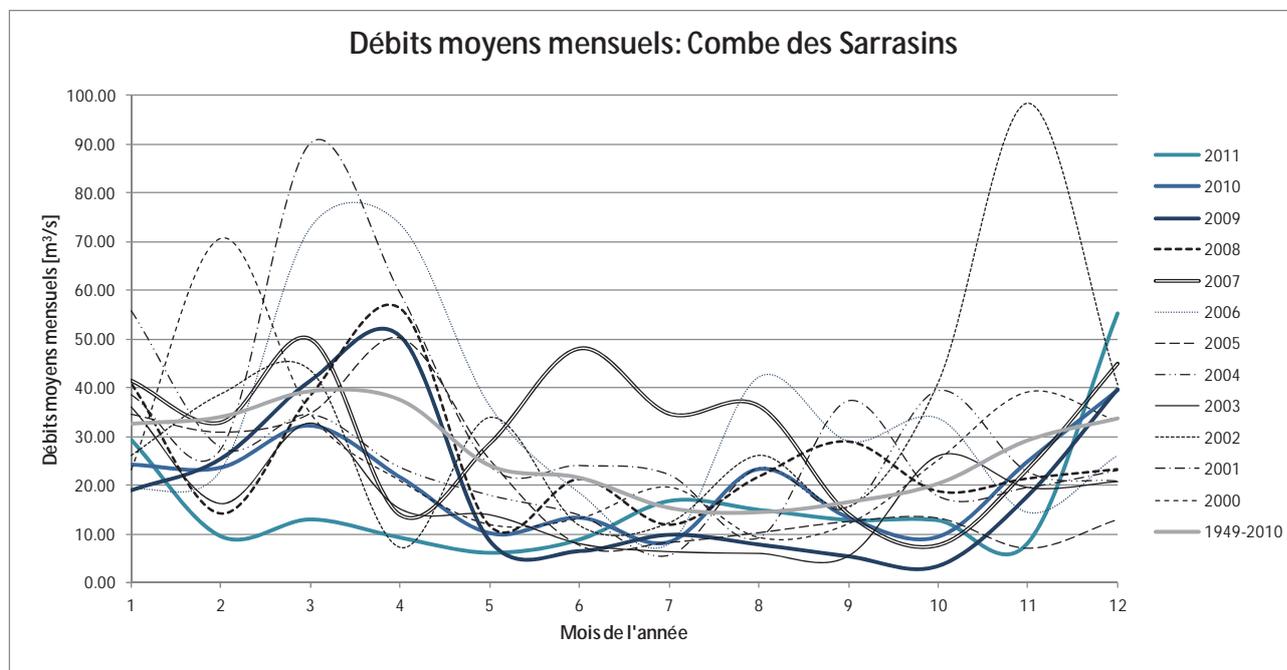


Figure 8 Graphique des débits moyens mensuels mesurés à la station fédérale de la Combe des Sarrasins. La représentation des données n'est pas adaptée mais offre une bonne lisibilité.

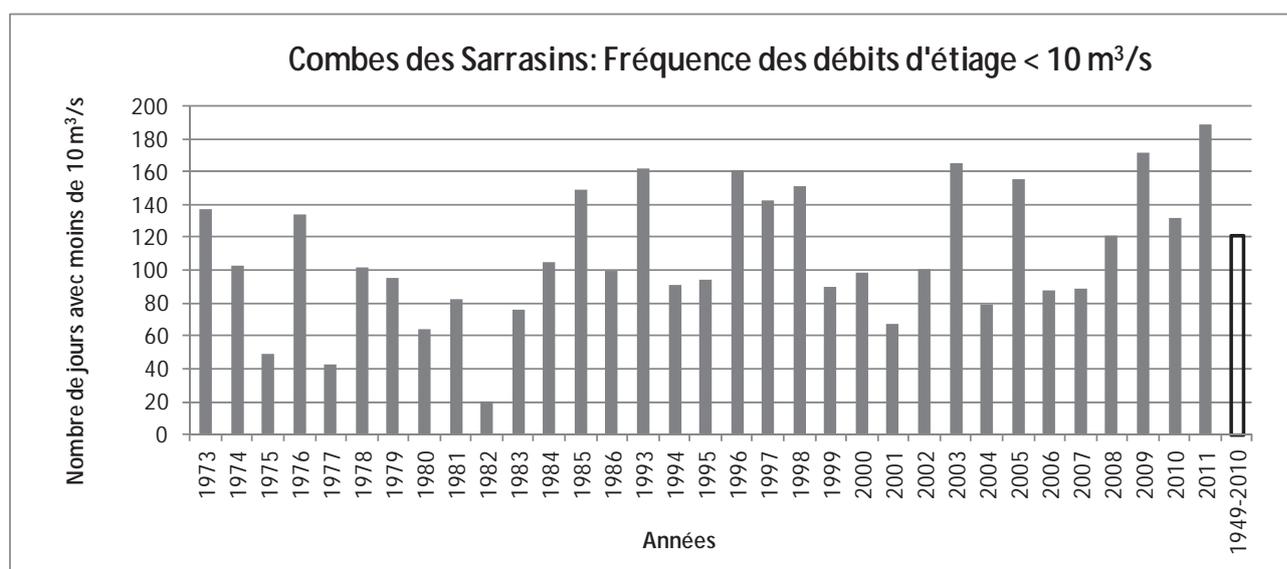


Figure 9 Graphique représentant la fréquence des jours avec un débit d'étiage inférieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les années 2009 ainsi que 2011 sont des années globalement très sèches avec des étiages prolongés sur des périodes parfois inhabituelles comme le printemps.

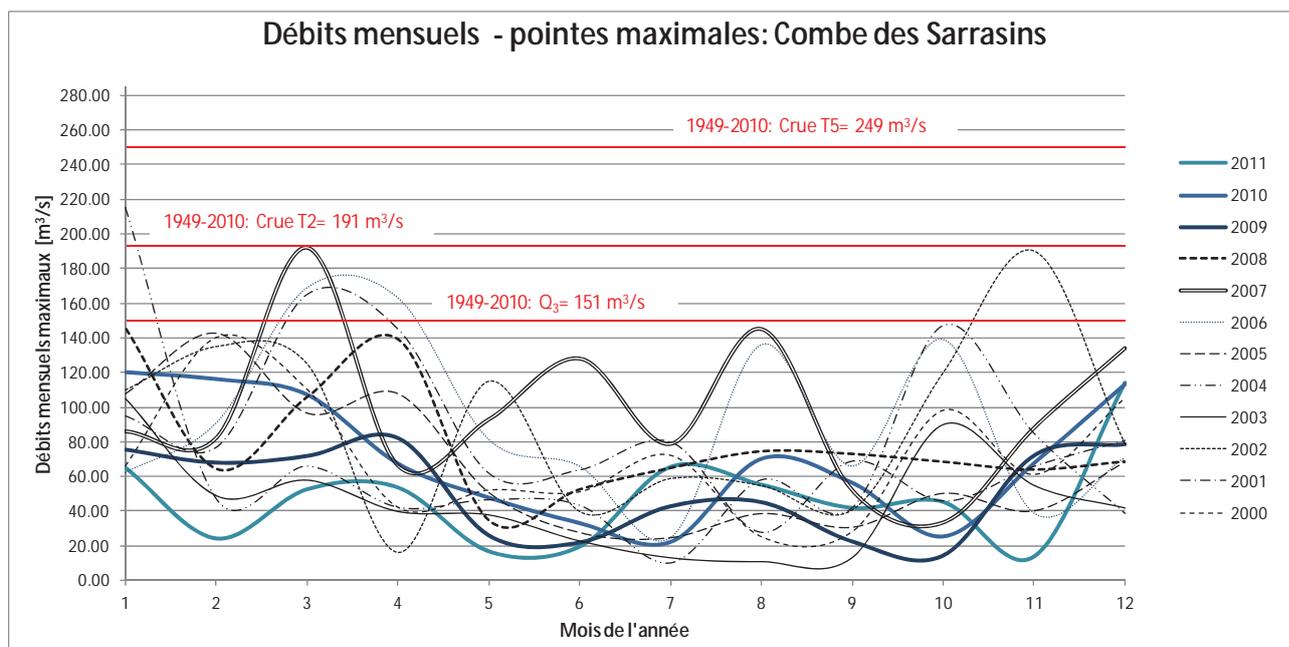


Figure 10 Graphique illustrant pour chaque mois les pointes maximales de débit (crue maximale). La représentation des données n'est pas adaptée mais offre une bonne lisibilité.

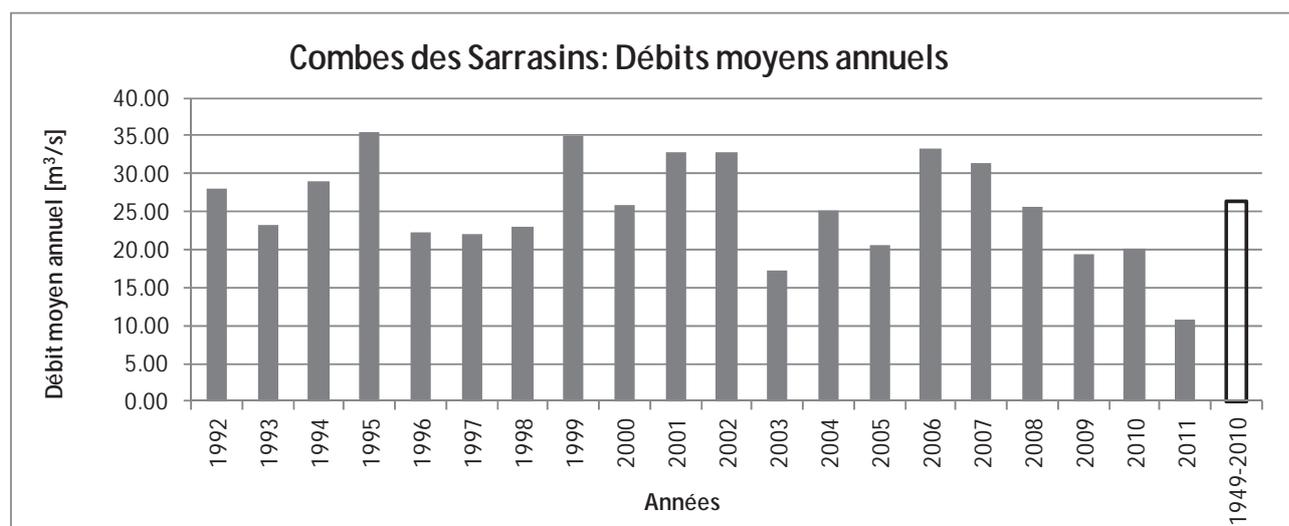


Figure 11 Graphique des débits moyens annuels.

Les graphiques ci-dessus confirment entre 2009 et 2011 des débits moyens annuels significativement plus bas que pour la période 1949-2010. On remarque également entre 2008 et 2011, l'absence de hautes eaux assimilables à une crue de 150 m³/s devant statistiquement se produire annuellement. Il est ainsi intéressant de souligner que depuis 1949, jamais l'absence de telles hautes eaux n'a été constatée 2 années consécutivement. Or, la crue de cette amplitude avant 2011 date de mars 2007. Bien que la présente étude n'ait pas cherché à décrire les débits déterminants dans les processus de charriage du Doubs, il est évident qu'il s'agit d'un phénomène hydrologique rare et que ses effets sur divers compartiments, en particulier le charriage et le colmatage du substrat, sont potentiellement importants. Les débits de la première moitié 2012 sont globalement bien plus importants qu'ils ne l'étaient en 2011.

6.2 Perturbation du régime hydrologique du Doubs

6.2.1 Exploitation de la force hydraulique

Comme décrit au chapitre précédent, les usines hydroélectriques du Châtelot, du Refrain et de la Goule modifient le régime hydrologique du Doubs par :

- > La création de tronçons court-circuités soumis à des prélèvements d'eau et dans lesquels ne subsiste qu'un débit résiduel.
- > Le stockage d'eau dans des bassins de retenue et le turbinage par éclusées.

L'exploitation par éclusées désigne l'alternance d'un débit élevé (débit d'éclusée) et d'un débit faible (débit plancher) que l'on observe, souvent chaque jour, dans un cours d'eau en aval de centrales hydroélectriques fonctionnant par intermittence. En Suisse, environ 25% des centrales hydroélectriques de tailles moyenne à grande provoquent ce genre de variations du débit ou y contribuent. Le régime hydrologique naturel ne «prévoit» pas ce genre de passages réguliers et souvent rapides d'un débit plancher à un débit d'éclusée (et vice-versa), de sorte que ces variations équivalent à une perturbation, sur le plan hydrologique comme sur le plan écologique (OFEV, 2003)³.

Le bureau Limnex dressait, en 2001⁴, une liste des centrales hydroélectriques suisses d'une puissance installée supérieure à 300 [kW] fonctionnant par éclusées, dont la répartition est représentée sur la carte ci-dessous.



Figure 12 Situation des installations hydroélectriques de plus de 300 kW fonctionnant par éclusées (Linxex, 2001).

³ Baumann P. & Klaus I. (2003): Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebs. BUWAL, Mitteilungen zur Fischerei Nr. 7

⁴ Linxex (2001): Schwall/Sunk-Betrieb in schweizerischen Fliessgewässern. Grundlagenstudie im Auftrag des BUWAL.

Les installations du Châtelot, du Refrain et de la Goule sur le Doubs sont par conséquent considérées comme des centrales avec dérivation fonctionnant par éclusées. Leurs caractéristiques synthétiques sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Le Châtelot	Le Refrain	la Goule
Première mise en service :	1953	1909	1894
Prochain renouvellement de concession :	2028	2032	2024
Longueur tronçon court-circuité [km] :	3.8	3	0.8
Retenue, capacité [en millions de m ³] :	20	?	0.3
Retenue, volume exploitable [en millions de m ³] :	12	1.2	0.08
Longueur de la retenue [km] :	2.5	2.7	1.1
Hauteur de chute exploitée [m] :	97	67	28
Débit équipé (débit maximal turbinable) [m ³ /s] :	44	23	18
Turbine	4 Francis sur 2 alternateurs	3 Francis double	1 Kaplan et 2 Francis
Puissance [MW] :	30	12	4.9
Energie annuelle moyenne produite [GWh] :	100	60	25.5
Débit résiduel sur tronçon court-circuité [m ³ /s] :	< 2006 : 0.25 > 2006 : 2	< 2011 : 0.89 > 2011 : 2	< 2001 : 0.25 > 2001 : 0.68
Rapport 2008 entre débit éclusé max et débit plancher = débit minimal turbiné + dotation (sans considérer les installations amont) :	22 :1	6.3 :1	3.9 :1
Rapport 2008 entre débit éclusé max et débit plancher = débit minimal turbiné + dotation (considérant l'influence des installations amont) :	22 :1	12.6 :1	9.8 :1

Tableau 3 Caractéristiques comparatives des 3 installations du Doubs franco-suisse fonctionnant par éclusées. Précisons qu'actuellement, la Goule fonctionne quasiment comme une centrale au fil de l'eau en raison notamment de l'envasement de sa retenue.

Les données du tableau ci-dessus montrent notamment que les éclusées du Châtelot (volume utile et débit maximal turbinable) sont théoriquement largement supérieures à celles du Refrain et de la Goule. Par conséquent, en phase d'exploitation maximale, la production d'énergie de pointe et les éclusées du Châtelot obligent actuellement les installations situées en aval à adapter leur régime d'exploitation.

La figure ci-après synthétise les modes d'exploitation des 3 installations précitées avant la mise en œuvre des mesures volontaires du Châtelot engagées en 2009 (cf. Tableau 5, page 34 Tableau 1).

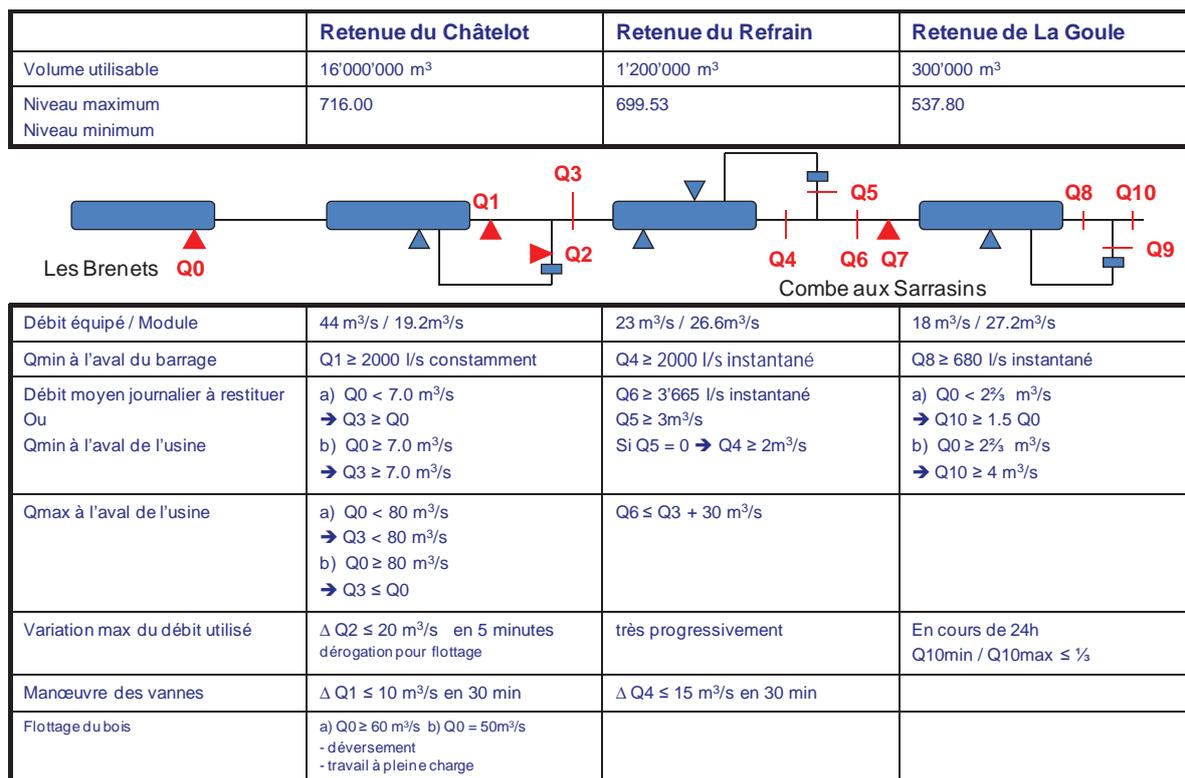


Figure 13 Synthèse du fonctionnement des trois centrales du Doubs franco-suisse fonctionnant par écluses. Le présent schéma synthétise les mesures décrites dans les concessions du Châtelot, dans le règlement d'eau de 1969 et dans l'Accord cadre du 30 juin 2003 concernant l'amélioration des écosystèmes dans le Doubs franco-suisse par la gestion des débits d'eau permanents. Les mesures volontaires entreprises depuis 2009 ne sont pas prises en considération dans le tableau. Source : Forces motrices de la Goule, 2007, adapté.



Figure 14 Comparaison d'un tronçon court-circuité à la Goule avec débit de restitution de 0.68 m³/s à gauche et après déversement d'une écluse provenant du Châtelot à droite (environ 20 m³/s).

Le Châtelot représente par conséquent un aménagement clé du point de vue de l'influence sur le régime hydrologique du Doubs. C'est pour cette raison notamment et également parce qu'il est le seul ouvrage hydroélectrique partiellement neuchâtelois sur le Doubs que le chapitre suivant lui est consacré.

6.2.2 Le Châtelot

6.2.2.1 Généralités

Le Châtelot appartient à la société des Forces Motrices du Châtelot (SFMC) dont les actionnaires sont : 50% Energie de France (EDF), 30% Groupe E SA, 11.66% Forces motrices de la Goule et 8.33% Etat de Neuchâtel. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

	Le Châtelot, usine principale	Usine de dotation
Ouvrage	Barrage "voûte", haut de 74 m - Larg. du couronnement 150 m - Epaisseur en crête : 2m - Epaisseur en pied : 14 m	Usine de dotation, environ 8 m de côté pour 9 mètres de hauteur.
Concessionnaire	SFMC	SFMC
Mise en service	1953	2006
Actes	Convention franco-suisse 1932	Accord Cadre de 2003 sur l'Amélioration des Débits du Doubs franco-suisse
Administratifs	Concession suisse 1950 pour 75 ans - Concession française (décret) 1953 pour 75 ans - Règlement d'eau commun entré en vigueur en 1969 – Accord Cadre de 2003 sur l'Amélioration des Débits du Doubs franco-suisse	Accord Cadre de 2003 sur l'Amélioration des Débits du Doubs franco-suisse
Fonctionnement	Par éclusées	Au fil de l'eau
Altitude supérieure du plan d'eau	716 m.sm	716 m.sm
Altitude turbinage	619 m.sm	658 m.sm
Hauteur de chute	67 - 97 m	38 - 59 m
Débit de dotation	Selon concession : 50 l/s - Selon convention 1969 : 250 l/s	Depuis 2006 : 2'000 l/s =débit de dotation
Débit d'équipement	Selon concession : jusqu'à 50 m ³ /s - débit équipé : 45 m ³ /s	Turbine de dotation 2 m ³ /s
Turbines	4 Francis sur 2 alternateurs	Turbine Francis
Puissance maximale	~ 30 MW	Turbine de dotation 950 kW
Production annuelle moyenne	100 GWh	Turbine de dotation 6'300 MWh

Tableau 4 Données techniques de l'usine du Châtelot et de sa turbine de dotation.

6.2.2.2 Gestion de la retenue

La retenue sert en particulier à stocker un volume d'eau utile aux turbinages de pointe (éclusées). Elle est également par la même occasion utilisée pour prévenir les risques liés aux crues ainsi qu'à maintenir lors d'étiages extrêmes un débit minimal dans le Doubs.

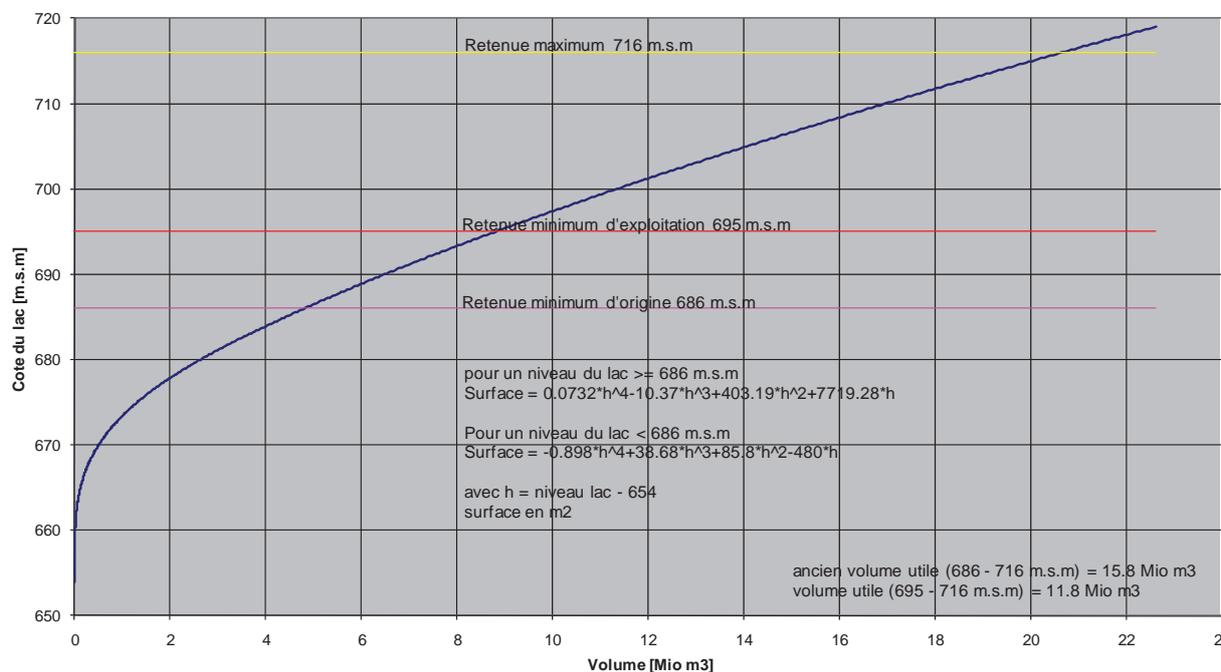


Figure 15 Volume utile du lac de Moron - relation hauteur/volume (Groupe E, 07.03.2006).

Bien que des marnages importants (cote inférieure à 700.00 m.sm atteinte annuellement entre 24 et 132 jours et répartie sur 3 à 4 périodes très sèches entre 2009 et 2011) empêchent quasiment tout développement de végétation sur la zone riveraine de battement, la retenue est aménagée de manière naturelle. Elle est par ailleurs inscrite à l'inventaire fédéral des sites paysagers d'importance nationale (Inventaire IFP n° 1006 : Vallée du Doubs) et fait partie du périmètre du projet de Parc naturel régional du Doubs. De plus, la retenue de Moron est un site touristique important qui s'inscrit dans le prolongement du lac des Brenets et du Saut du Doubs. Elle est desservie par un réseau de sentiers pédestres et cyclistes étoffés et très fréquentés durant la période estivale en particulier. La nature géologique des rives impose un rythme d'abaissement de maximum 2 mètres par jour. Le nombre de jours où le barrage déverse est en moyenne de 20 par année.

6.2.2.3 Débit résiduel

Les eaux captées par l'installation du Châtelot dans la retenue de Moron sont dérivées sur une distance de 3.8 km avant d'être turbinées. Sur les 3.8 kilomètres que compte ce tronçon court-circuité, le Doubs est soumis à un débit résiduel, c'est-à-dire un débit minimal qui doit être garanti en permanence. Ce débit doit être, selon la concession, de 250 l/s. Diverses études ayant notamment montré que cette valeur était inférieure au minimum vital pour le Doubs, diverses négociations et discussions ont permis de fixer dans "l'accord cadre de 2003 sur l'Amélioration des Débits du Doubs franco-suisse" une augmentation de ce débit à 2

m³/s. La mise en place d'une turbine de dotation permettant de délivrer ce débit et de limiter les pertes de production hydroélectrique a été concrétisée en 2005.

Dans ce secteur, le débit de dotation est ainsi actuellement plus de 2 fois supérieur au débit minimal prescrit par la LEaux qui est de 785 l/s si l'on se base sur le Q₃₄₇ de la station hydrologique des Brenets qui est de 2'130 l/s. Dans le tronçon court-circuité, aucune éclusée n'est effectuée. Le débit est par conséquent constant. Il est dépassé uniquement lors de déversements du barrage, soit environ 20 jours par année.



Figure 16 Vue du Tronçon court-circuité de l'installation du Châtelot avec le débit de dotation de 2 m³/s..



Figure 17 Vue du Doubs à l'aval de l'usine du Châtelot avec un débit d'étiage d'approx. 4 m³/s

6.2.2.4 Eclusées - évolution

Depuis la fin des années 1990 et particulièrement depuis l'Accord Cadre de 2003 sur l'Amélioration des Débits du Doubs franco-suisse, des efforts ont été réalisés par SFMC particulièrement sur l'augmentation des débits planchers et la modulation des éclusées. Ces améliorations sont synthétisées dans le tableau ci-après.

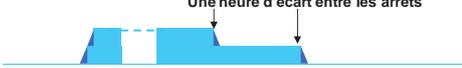
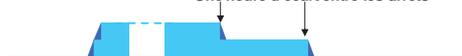
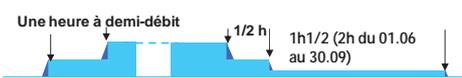
Date clef	Débit résiduel	Principe d'adaptation des éclusées
Concession du 28.01.1947	0.05 m ³ /s 	
Règlement d'eau du 05.02.1969	0.25 m ³ /s 	Augmentation du débit ≤ 20 m ³ /s en 5 min 
Accord de Maiche du 27.05.1998	0.25 m ³ /s 	Une heure d'écart entre les arrêts 
Accord cadre du 30.06.2003	2.00 m ³ /s 	Une heure d'écart entre les arrêts 
Dès 2006	2.00 m ³ /s 	Une heure d'écart entre les arrêts 
Dès 2007	2.00 m ³ /s 	Une heure à demi-débit Une heure d'écart entre les arrêts 
Dès 2009	2.00 m ³ /s 	Une heure à demi-débit 1/2 h 1h1/2 (2h du 01.06 au 30.09) 

Tableau 5 Synthèse des modifications positives apportées par les Forces motrices du Châtelot sur l'hydrologie du Doubs franco-suisse (adapté de Groupe E SA, 2011).

Parallèlement, depuis la construction de la centrale, diverses adaptations et changements ont été effectués sur les éclusées, spécialement sur les fréquences et les amplitudes de ces dernières (différence entre le débit minimum restitué et le débit turbiné).

Une évaluation a été réalisée par la DIREN⁵ (Direction Régionale de l'Environnement région Franche-Comté, actuellement DREAL) entre 1992 et 1993 grâce à une station provisoire de mesures hydrologiques installée au lieu-dit « Pont de la Rasse ». Les données recueillies sur cette station ont notamment permis d'évaluer les éclusées qui étaient pratiquées à cette époque et leur influence sur certains compartiments abiotiques du milieu aquatique.

⁵ DIREN (1994) : Le Doubs franco-helvétique : Aménagements hydroélectriques - Situations hydrodynamiques et thermiques, éléments de sédimentologie et de biologie.

Les éclusées appelées « caractéristiques » ont ainsi été décrites. Elles sont présentées sur la figure ci-après.

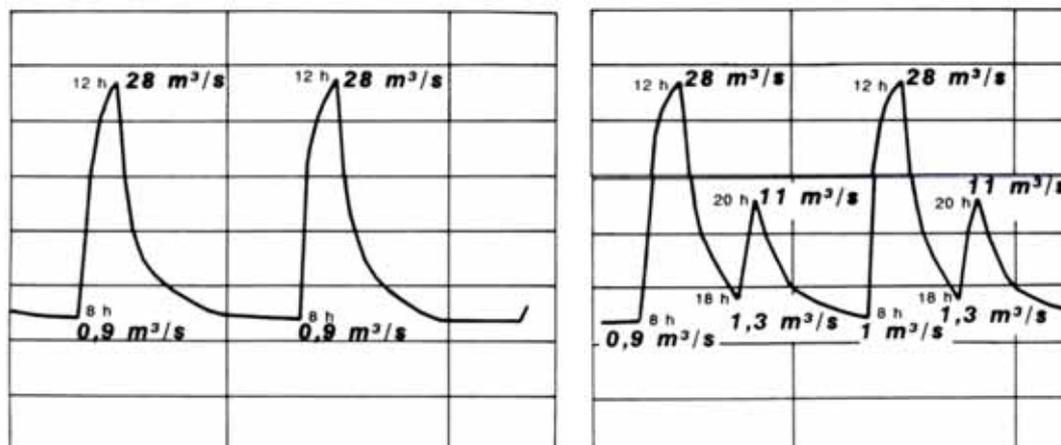


Figure 18 Turbinage de pointe du Châtelot à la station provisoire de la Rasse (1992-1993) – Eclusées caractéristiques (DIREN, 1994).

Par la suite, divers changements sont intervenus consistant essentiellement en l'augmentation des débits résiduels minimaux qui ont notamment eu pour conséquence une sensible diminution des amplitudes des éclusées. Dès 2006, en préparation des opérations de libéralisation du marché de l'électricité, les nouveaux gestionnaires du Châtelot ont optimisé les possibilités et les droits de leur concession, donnant lieu à des éclusées d'amplitudes en moyenne plus importantes et globalement plus fréquentes. L'augmentation des éclusées à l'aval de l'usine du Refrain a été étudiée et est présentée ci-après.

Le suivi du régime hydrologique du Doubs a ainsi été comparé entre 2000, 2004 et 2006 à la station fédérale de mesure hydrologique de la Combe des Sarrasins (LH 2270). Les années comparées ont été retenues sur la base des événements présentés dans le tableau suivant.

Année	Événements importants du point de vue politique ou/et hydraulique
1994	Août 1994, début de travaux à l'usine du Refrain, mise hors service partielle de l'installation. Arrêt partiel des éclusées durant deux ans.
1997	Mai 1997, remise en service complet de l'installation du Refrain.
1998	Accord de Maïche concernant l'atténuation des effets des éclusées.
2003	Accord-cadre du 30 juin 2003 concernant l'amélioration des écosystèmes dans le Doubs franco-suisse par la gestion des débits d'eau permanents.
2005	Mise en service de la turbine de dotation du Châtelot augmentant le débit de restitution de 0.25 à 2 [m³/s].
2006	Reprise du Châtelot par le groupe E.
2008	Mise en œuvre progressive de la libéralisation du marché de l'électricité en Suisse.

Tableau 6 Tableau récapitulatif des changements importants survenus entre 1994 et 2006 en relation avec les usines du Châtelot, du Refrain et de la Goule. Précisons que dès 2004 et jusqu'en 2008, l'engagement des groupes a été fait par la société Avenis, filiale d'EOS. Groupe E a repris cette activité en août 2008.

Précisons qu'en 2004, un groupe turbine-générateur du Châtelot est resté indisponible durant approximativement 6 mois, de même qu'un autre groupe en 2006 durant 6 mois.

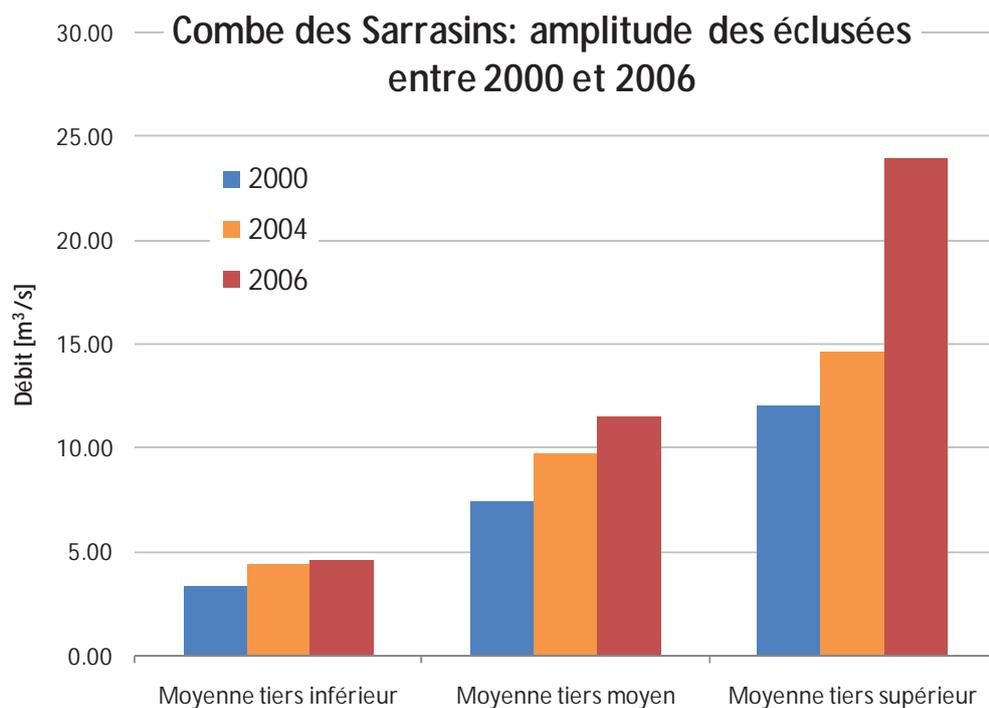


Figure 19 Comparaison des amplitudes moyennes : tiers inférieur, moyen et supérieur, entre 2000, 2004 et 2006

Au total, plus de 100'000 données ont été intégrées à la présente analyse (cf. annexe 2). Ces dernières donnent une vue d'ensemble, comparativement pour les trois stations, dans le but de définir la tendance des éclusées au cours des années considérées.

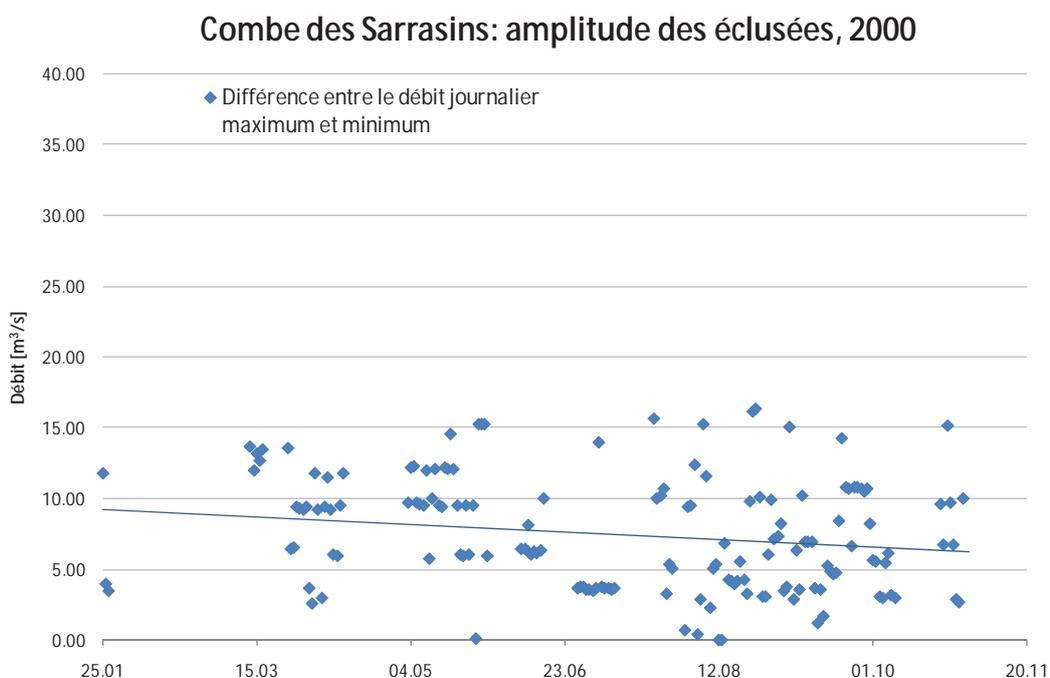


Figure 20 Graphique des variations journalières de débit provoquées par les éclusées lors de l'année 2000.

Combe des Sarrasins: amplitude des éclusées, 2004

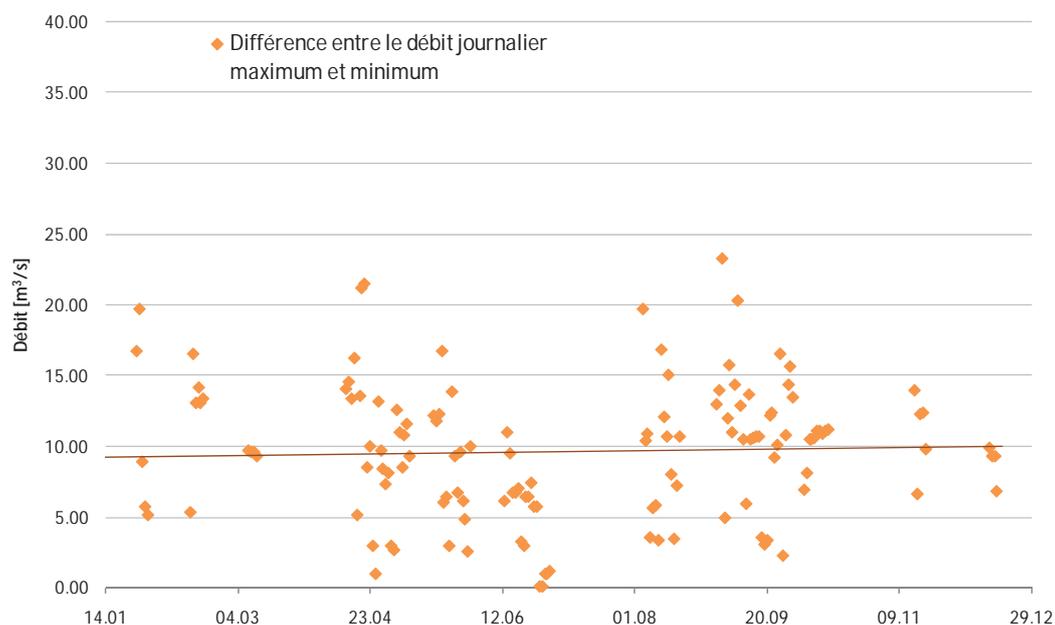


Figure 21 Graphique des variations journalières de débit provoquées par les éclusées lors de l'année 2004.

Combe des Sarrasins: amplitude des éclusées, 2006

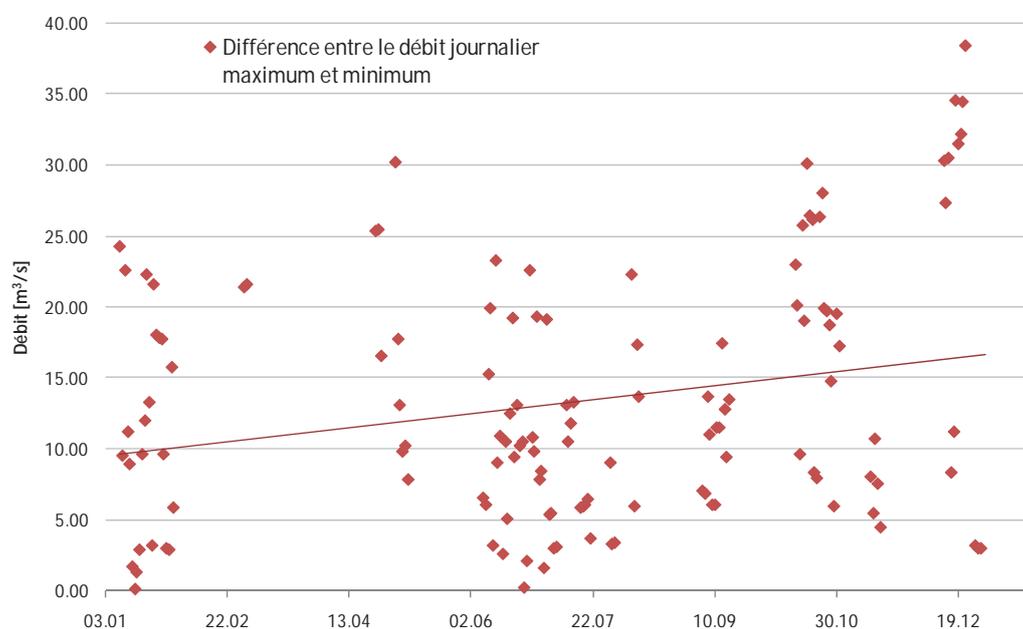


Figure 22 Graphique des variations journalières de débit provoquées par les éclusées lors de l'année 2006.

La différence entre le débit journalier maximum et minimum a été calculée et représentée graphiquement pour tous les jours où une écluse caractéristique a été détectée, en excluant les crues, débits d'étiages et autres séquences hydrologiques « atypiques ». Cette sélection est très discutable en raison de l'influence de l'installation du Refrain et de l'indisponibilité répétée de certaines turbines du Châtelot. L'interprétation que l'on peut en tirer n'est donc pas forcément représentative du mode d'exploitation du Châtelot en général et sur une longue période en particulier. On constate ainsi à l'aval du Refrain entre 2000 et 2006 une augmentation significative des amplitudes journalières des débits. Ce phénomène a indéniablement un effet négatif du point de vue hydrobiologique sur un linéaire de plusieurs dizaines de kilomètres en aval, comme le confirment les mesures de débits effectuées à Ocourt. Quelques pointages effectués entre 2009 et 2010 mettent fréquemment en évidence des éclusées de 40 m³/s d'amplitude (cf. figure ci-après).

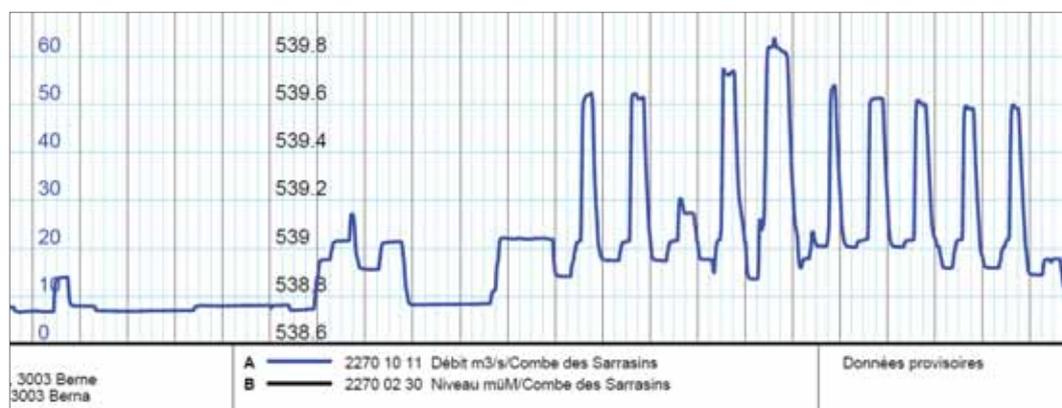


Figure 23 Extrait du suivi de la station fédérale de mesure hydrologique de la Combe des Sarrasins, extrait du relevé au mois de juillet 2011. En abscisse, chaque trait noir représente une journée.

Aujourd'hui, en phase d'exploitation normale, les effets des éclusées des usines du Refrain et de la Goule sont globalement actuellement « masqués » par les éclusées du Châtelot dont le débit d'équipement ainsi que le volume utile sont largement supérieurs aux deux autres installations.

Des essais de démodulation ont été réalisés en 2010 et 2011, ceux-ci avaient pour but d'évaluer les possibilités d'atténuer les éclusées du Châtelot en utilisant les capacités tampons des retenues du Refrain et de la Goule. Les résultats de ces essais et les possibilités de mises en œuvre sont en cours d'analyse.

6.2.2.5 *Charriage, purges et vidanges*

Le lac des Brenets situé 500 mètres en amont de la retenue de Moron constitue une retenue naturelle qui piège la totalité du charriage et la majorité des sédiments fins. Aucune vidange de la retenue de Moron ou purge n'a en effet du être effectuée, pour des raisons de production électrique, depuis la construction du barrage en raison du faible taux de sédimentation dans la retenue. Seules des opérations d'ouverture des vannes de fond sont par conséquent pratiquées pour des raisons de sécurité liées aux crues afin de vérifier le bon fonctionnement des équipements.

6.2.3 Degré de perturbation du régime hydrologique

La perturbation du régime hydrologique sur le Doubs est essentiellement liée à deux facteurs : la création de tronçons soumis à un débit résiduel ainsi que l'exploitation dite « par éclusées ». Si le premier ne concerne que certains tronçons, le second influence significativement des dizaines de kilomètres du Doubs. A la station des Brenets (LH-2247), l'hydrologie du Doubs n'est pas influencée par des installations hydroélectriques, permettant notamment de mettre en relief sur le graphique ci-après l'influence des éclusées de l'installation hydroélectrique du Châtelot. Précisons dans ce contexte que selon le règlement d'eau, l'installation du Refrain a pour but de démoduler les éclusées du Châtelot.

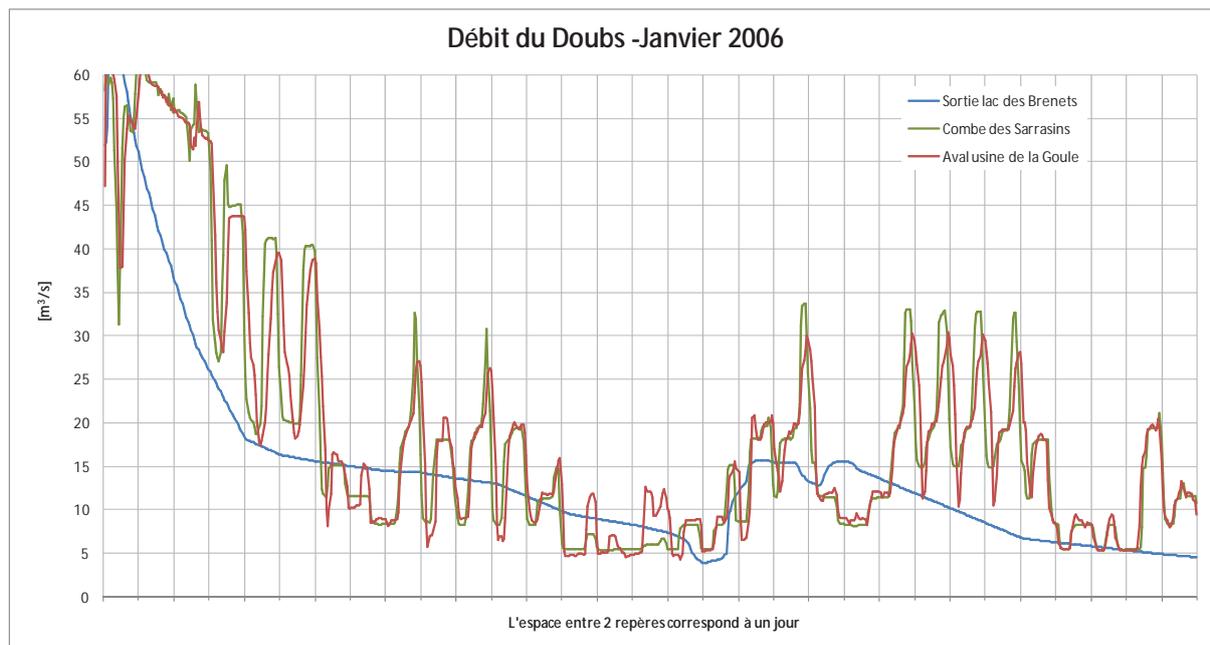


Figure 24 Graphique des débits mesurés dans trois stations au cours du mois de janvier 2006.

Ce type d'épisode provoque un stress plus ou moins important sur la faune aquatique en fonction notamment de :

- > La fréquence des éclusées (majoritairement quotidiennes). Plus la fréquence est élevée et plus l'impact est important.
- > La différence entre le débit minimal (plancher) et le débit maximal lors de l'éclusee. Plus cette différence est grande et plus l'impact est fort.
- > La vitesse maximale du changement de débit, c'est-à-dire le taux maximum d'accroissement et de la diminution du débit (en $[m^3/s]$ par minute).
- > La durée du débit minimal qui s'étend couramment sur tout le week-end.

De nombreuses études se sont penchées sur la question des effets des éclusées. Une synthèse a été réalisée dans une étude bibliographique réalisée par l'OFEV en 2003⁶.

⁶ Peter Baumann, Iris Klaus (2003) : Conséquences écologiques des éclusées - Etude bibliographique. Information concernant la pêche n° 75. OFEV.

Ce document conclut que dans la plupart des cours d'eau étudiés, l'exploitation par éclusées tend à réduire les peuplements macrozoobenthique et piscicole et à modifier leur composition, ainsi qu'à accroître le nombre des organismes qui dérivent dans le cours d'eau lorsque le débit augmente et le nombre de ceux qui s'échouent sur la berge lorsque le débit diminue. Les modifications hydrologiques et écologiques sont en général si importantes que l'on peut assimiler le régime d'éclusées à une perturbation («disturbance») que ne présente jamais le régime naturel ou alors seulement quelques fois dans l'année lors des crues. Dans le cas du Doubs, des instruments scientifiques pour évaluer l'incidence de l'artificialisation du régime hydrologique ont été employés dès 1969⁷. Parmi les études qui ont été réalisées à ce sujet, quelques-unes sont présentées ci-après.

6.2.3.1 *Indicateur hydrologique*

Le bureau BG Ingénieurs SA a évalué courant 2011 la perturbation du régime hydrologique du Doubs par la méthode HYMOD de la Confédération helvétique (module Hydrologie – régime d'écoulement (abrégé HYDMOD) au niveau R (région) du système modulaire gradué). La version employée est le projet d'octobre 2007⁸. Le module Hydrologie (HYDMOD) est la méthode mise au point pour décrire la situation hydrologique d'une région en y relevant les atteintes liées à la gestion des eaux et en évaluant leurs effets sur le régime d'écoulement (http://www.modul-stufen-konzept.ch/f/hydro_startseite_f.htm).

Les résultats obtenus concluent que le régime d'éclusées du Châtelot et du Refrain engendrent une perturbation majeure du régime hydrologique à l'aval, sur tout le Doubs suisse et franco-suisse. Selon l'analyse des éclusées réalisées sur la période 2007-2008 et 1969-2005, corroborée par les résultats de Courret et Larinier⁹, les tendances suivantes sont constatées depuis la gestion orientée vers le marché de l'électricité, qui coïncident avec la reprise de la gestion du Châtelot par le Groupe E en 2006 :

- > Le retour entre deux éclusées à un débit de base proche du débit minimum est plus fréquent.
- > Le Châtelot turbine à pleine puissance pour environ la moitié des éclusées, ce qui était rarement le cas auparavant. Cela engendre des déversements plus fréquents au Refrain.
- > Cela peut aussi provoquer une "désoptimisation" plus fréquente des ouvrages, avec une augmentation de l'amplitude des éclusées en aval des aménagements du Refrain et de la Goule par rapport à l'amont.
- > Les vitesses de montée/descente ont progressivement diminué de 1994 à 1999 (suite à un accord à ce sujet en 1998¹⁰), puis sont restées stables jusqu'en 2006. En 2007, elles ont de nouveau augmenté, environ jusqu'au niveau de 1994.
- > Le nombre d'éclusées perçues par année à Ocourt a augmenté.

⁷ Bouvier J.-C. (1969) : Les effets des variations journalières du niveau du Doubs sur la petite faune aquatique. Bull. de l'Association pour la défense des intérêts du Jura.

⁸ Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau, Hydrologie – régime d'écoulement Niveau R (région), Projet d'octobre 2007, OFEV.

⁹ Suivi de l'amélioration du Doubs franco-suisse, Analyse hydrologique, Rapport, COURRET et LARINIER. mars 2008

¹⁰ Accord de mai 1998 pour une atténuation des baisses de débit à l'aval de la centrale du Châtelot

- > Selon l'indicateur synthétique de Courret et Larinier (2008), la perturbation hydrologique liée aux éclusées a augmenté d'une classe ou plus en 2007 par rapport aux dix années précédentes. Pour chaque station (à l'exception de la Combe des Sarrasins qui est biaisée), la perturbation hydrologique évaluée en 2007 est supérieure à toutes celles de la période de mesures (soit depuis les années 1970-1980). Relevons que 2007 était localement une année hydrologique particulièrement favorable, notamment pour la production d'hydroélectrique.

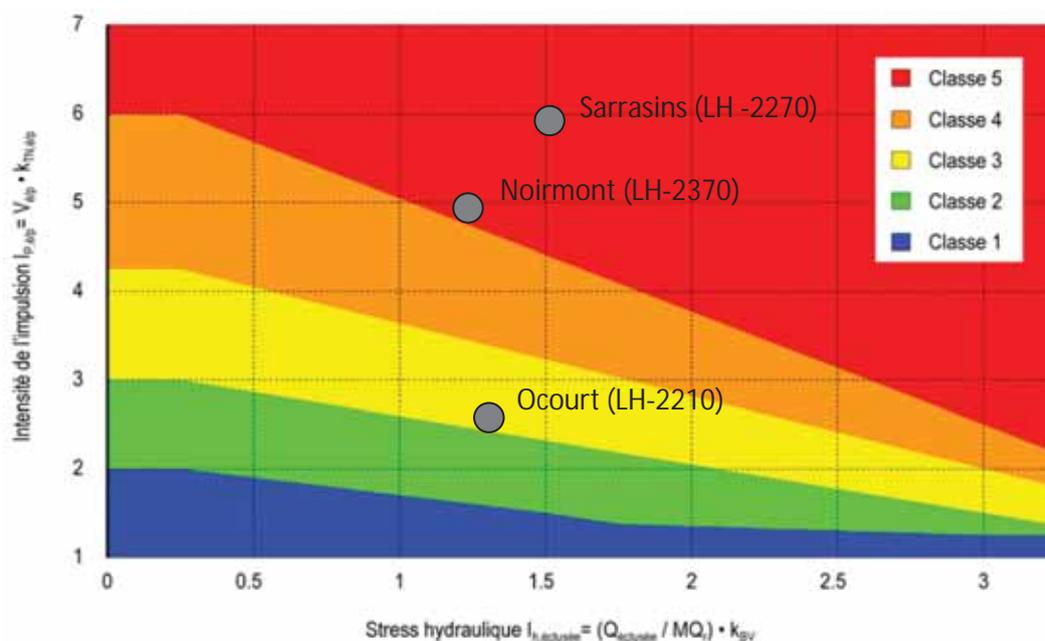


Figure 25 Règle de classement HYDMOD pour le phénomène d'éclusées (BG, 2011).

	1 Comportement des débits moyens	2 Fréquence de crue*	3 Saisonnalité des crues	4 Débit d'étiage	5 Saisonnalité de l'étiage	6 Durée des périodes d'étiage	7 Phénomène d'éclusee	8 Purges et vidanges	Somme des évaluations individuelles	Evaluation globale
Barrage du Refrain à la Goule	1	3*	1	1	2	1	5	1	23	3

* la fréquence des crues est également en classe 3 pour la station des Brenets, représentative de l'hydrologie naturelle. Il n'y a donc pas de déficit en état altéré par rapport à l'état de référence

Tableau 7 Synthèse des résultats de l'évaluation HYDMOD par tronçon (BG, 2011).

Légende

 Classe 1 : Naturel, proche de l'état naturel	 Classe 4 : Fortement atteint
 Classe 2 : Peu atteint	 Classe 5 : Artificiel
 Classe 3 : Passablement atteint	Sans évaluation

6.2.3.2 Indicateurs habitationnels

La majorité des diverses méthodes d'évaluation ou/et de modélisation des perturbations habitationnelles des hydrosystèmes, de même que certaines bases légales telles que la LEaux se réfèrent principalement aux 2 critères suivants :

- > Critère productivité : basé sur l'évolution prévisible de la biomasse du macrozoobenthos en fonction de la **longueur mouillée** (sur le profil en travers).
- > Critères "piscicoles" : basés sur l'importance que revêtent l'**espace vital** et la libre circulation des poissons.

La production de macroinvertébrés aquatiques dépend en effet essentiellement de la surface mouillée du lit le plus fréquemment inondé d'un cours d'eau. Les groupes de travail hydrobiologiques de l'OFEFP (AKERET, 1982; BUNDI, 1989)¹¹ estiment que des débits inférieurs ou supérieurs à certains seuils entraînent des perturbations plus ou moins importantes dans les mécanismes de production.

Pour la faune piscicole, le critère principal est l'espace vital, on considère selon les espèces présentes la section mouillée du cours d'eau ayant au moins 20 à 30 cm de profondeur. Compte tenu de la présence dans le Doubs de poissons de grande taille (> 50 cm) on peut raisonnablement considérer un espace vital minimal à 30 cm. Le schéma ci-dessous illustre ce concept.

La libre migration piscicole est ainsi entre autres assurée par une profondeur d'eau minimale. Cette profondeur d'eau minimale doit être atteinte sur au moins un point d'un profil en travers et ne pas se prolonger sur une longueur trop importante.

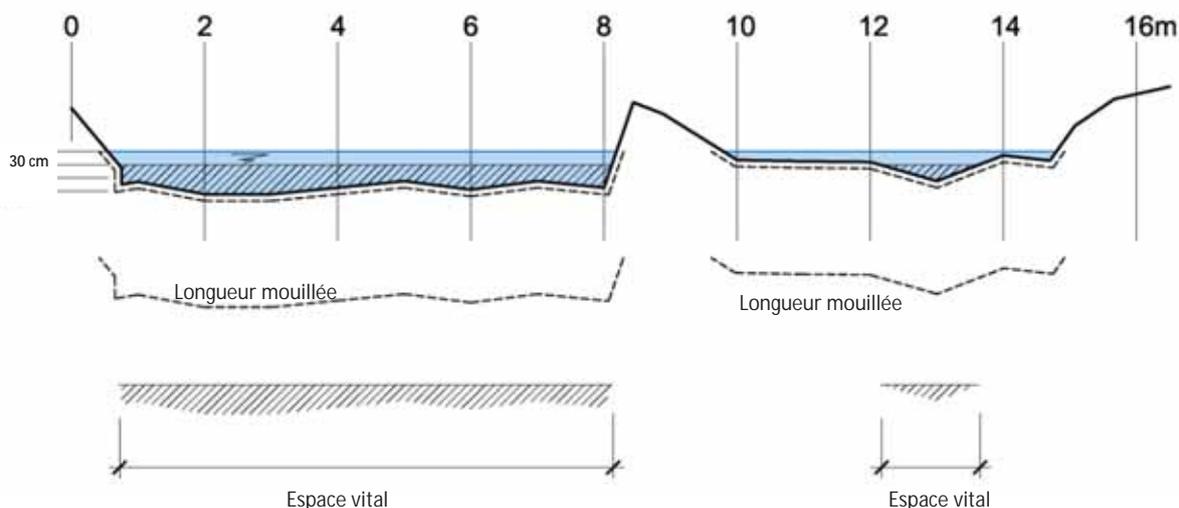


Figure 26 Principe schématique de la longueur mouillée et de l'espace vital.

Aucune analyse détaillée de l'espace vital n'a à notre connaissance été réalisée, probablement parce qu'on remarque ponctuellement et visuellement de manière générale

¹¹ Akeret, E. (1982): Schlussbericht der interdepartementalen Arbeitsgruppe Restwasser Bern 401 pp.

Bundi, U. et al. (1989): Prélèvements dans les cours d'eau: exigences en matière de débits résiduels pour l'écologie des eaux. Cahiers de l'environnement No 110. OFEFP, Berne.

que des hauteurs d'eau sont très rarement critiques et problématiques pour assurer les déplacements piscicoles.

La Direction Régionale de l'Environnement région Franche-Comté, actuellement DREAL, a effectué en 1994 une étude visant à estimer les surfaces mouillées subissant des marnages liés aux éclusées du Châtelot¹². La DIREN prenait en considération des éclusées typiques de 0.9 à 28 m³/s sur la série de profils présentés ci-après.

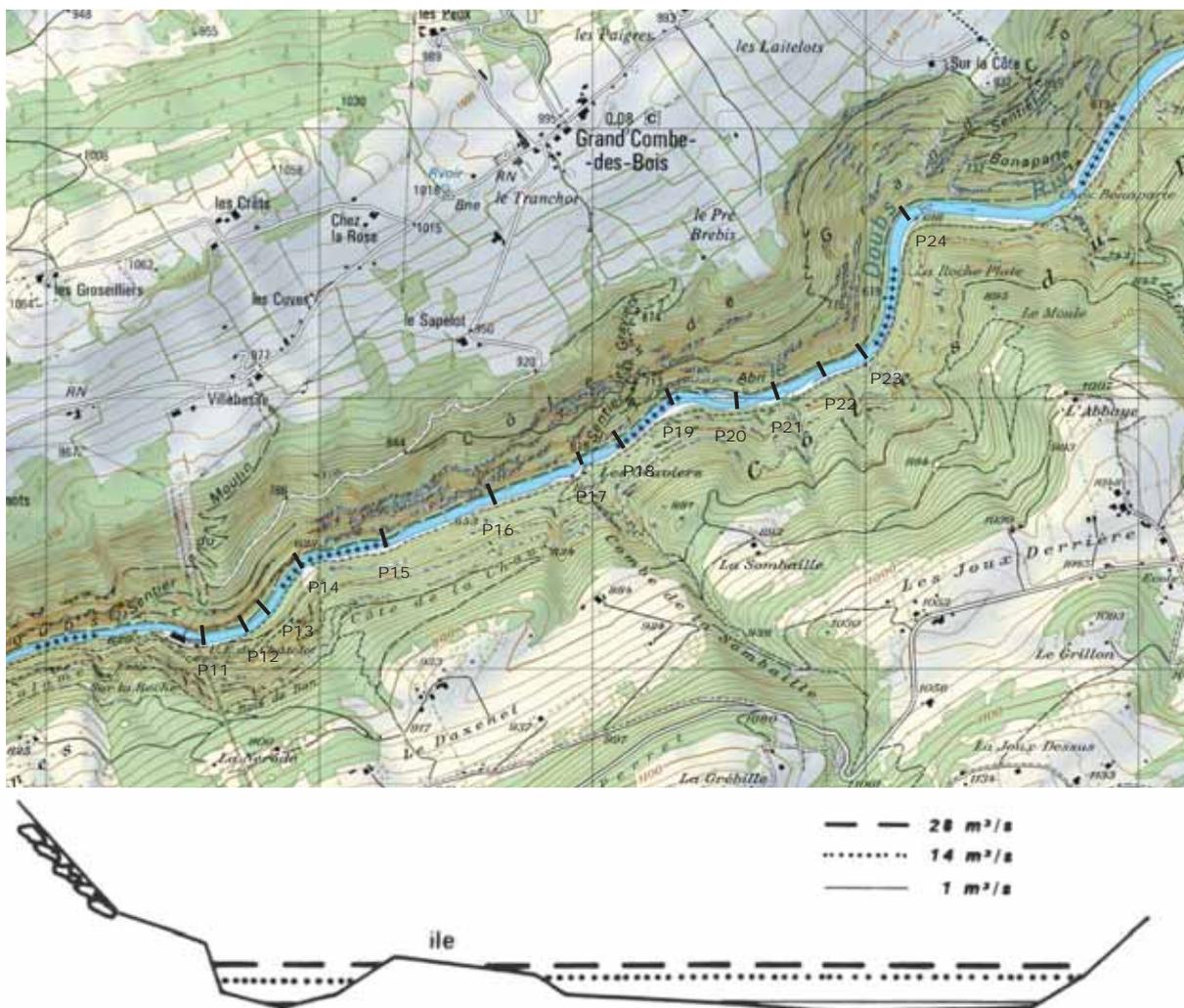


Figure 27 Profils en travers utilisés en 1994 par la DIREN pour évaluer la surface mouillée impactée par les éclusées. Exemple du profil n° 18.

D'une précision pouvant être qualifiée de moyenne, cette méthode permettait de conclure à l'époque que les surfaces artificiellement inondées et exondées représentaient en moyenne 40% du lit du Doubs. Lors de ces investigations, les mesures limnimétriques effectuées en 1994 à la station temporaire de « La Rasse » montraient des variations de niveau d'environ 40 à 60 cm lors des éclusées « typiques ».

¹² DIREN (1994) : Le Doubs franco-helvétique : Aménagements hydroélectriques - Situations hydrodynamiques et thermiques, éléments de sédimentologie et de biologie.

Depuis 2006, on constate que les débits résiduels minimaux à l'aval de l'usine du Châtelot sont plus importants que lors de l'étude de la DIREN¹³ et augmentent ainsi la surface du lit mouillée en permanence. Toutefois, l'amplitude des éclusées a également significativement augmenté à cette même période. On constate ainsi sur la base de 2 courbes de tarage des stations fédérales de mesures hydrologiques LH-2270 et LH-2370, qu'une éclusée « typique » engendre des variations de niveau d'eau de plus de 87 cm, provoquant ainsi localement et successivement l'inondation et l'isolement, voir l'assèchement complet de bras secondaires du Doubs.

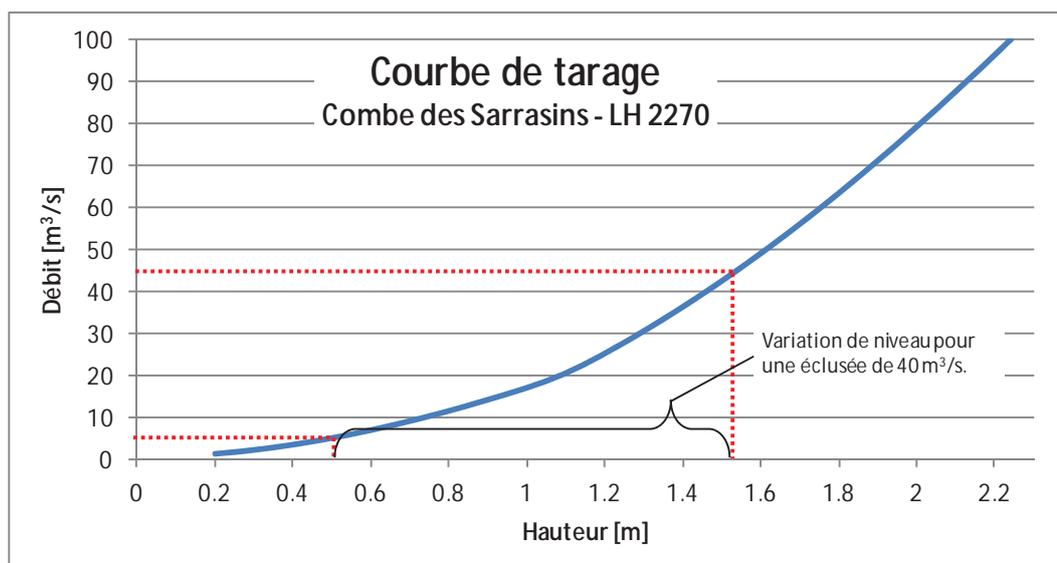


Figure 28 Relation hauteur/débit (courbe de tarage), station LH-2270. Pour une éclusée « typique » d'amplitude de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta h > 100 \text{ cm}$.

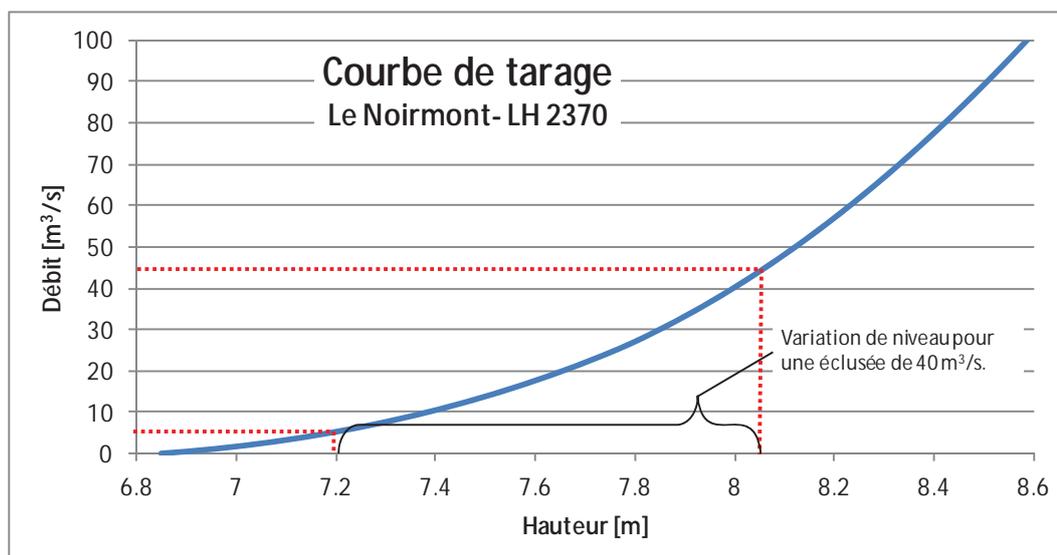


Figure 29 Relation hauteur/débit (courbe de tarage), station LH-2370. Pour une éclusée « typique » d'amplitude de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta h > 87 \text{ cm}$.

¹³ DIREN (1994) : Le Doubs franco-helvétique : Aménagements hydroélectriques - Situations hydrodynamiques et thermiques, éléments de sédimentologie et de biologie.

6.2.3.3 Indicateurs biologiques

Degiorgi F. et Champigneulle A., (2000)¹⁴ ont démontré dans le cadre d'un projet de recherche sur l'efficacité des alevinages en truites de rivière du Doubs franco-suisse, l'incidence des éclusées sur les populations en place et réintroduites de cette espèce.

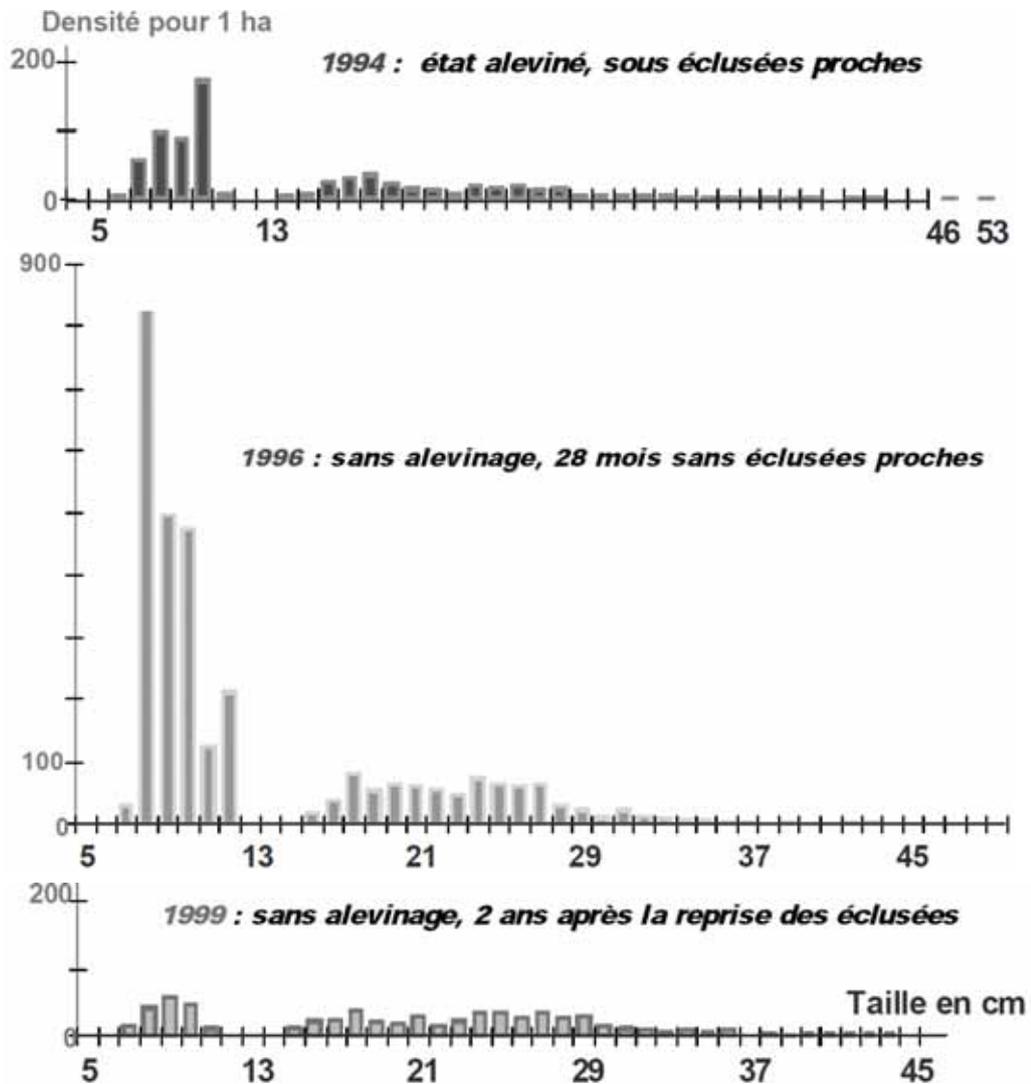


Figure 30 Comparaison des densités et des compositions en taille des échantillons de truites capturées sur la station du Câble en septembre 1994, octobre 1996 et septembre 1999 (effectifs bruts capturés en deux passages ramenés à la même surface).

Selon les auteurs, le chômage de l'usine du Refrain, ayant entraîné l'arrêt presque total des éclusées de cette exploitation pendant plus de deux ans a permis le développement harmonieux d'un peuplement plus dense, se rapprochant nettement de l'optimum théorique, alors que les éclusées du Châtelot ont perduré durant cette période. La densité d'ombres a également augmenté de façon spectaculaire entre les deux inventaires de 1994 et 1999. Des considérations complémentaires sur les effets des éclusées sur la faune piscicole sont présentées au chapitre 8.3 Faune piscicole.

¹⁴ Degiorgi F., Champigneulle A., (2000). Diagnose piscicole et mesure de l'efficacité des alevinages en truite sur le Doubs Franco-Helvétique. Rapport final.119 p. + annexes

6.2.3.4 *Bilan - perspectives*

Il existe de multiples études qui démontrent les perturbations engendrées par l'exploitation des centrales hydroélectriques sur le régime hydrologique du Doubs et ses différents compartiments hydrobiologiques. Certaines sont d'ailleurs, à l'heure de la rédaction de ce rapport, en cours de réalisation. On retiendra sur la base de ces études que la réduction des amplitudes des éclusées constitue un objectif d'amélioration environnementale prioritaire pour le Doubs.

Les installations hydroélectriques responsables de ces perturbations, en particulier le Châtelot, ont toutefois été construites et ont pour mandat de produire de l'énergie de pointe. Il n'est donc pas facile dans ce contexte, en plus binational, d'influer sur ces pratiques sans provoquer des pertes économiques significatives ou/et sans entrer en conflit avec les objectifs de production et de fonctionnement des centrales.

Des essais de démodulation visant à mieux amortir les éclusées du Châtelot par les retenues du Refrain et de la Goule ainsi qu'un modèle de propagation de l'onde d'éclusée ont été testés et sont actuellement en cours d'analyse (cf. annexe 3). Diverses questions restent à ce sujet ouvertes concernant les incidences de ces opérations sur les milieux naturels dont certains figurent dans des inventaires fédéraux et sur les risques écotoxicologiques des sédiments en place susceptibles d'être remis en suspension (ou qui auraient pu être remis en suspension si l'intérêt de les évacuer pour augmenter le volume de rétention et améliorer l'efficacité des opérations de démodulation s'était avéré effectif).

Les conclusions de ces essais seront probablement utilisées dans les processus d'application et de mise en œuvre des prochaines adaptations des règlements d'exploitation, semble-t-il en 2014, peut-être avant. De plus, plusieurs contraintes d'exploitation vont à notre connaissance survenir à court et moyen terme, lesquelles sont susceptibles d'atténuer ces prochaines années les impacts des éclusées :

- > Mise en application de la nouvelle Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) le 1^{er} janvier 2011.
- > Mise en application des nouvelles ordonnances sur la protection des eaux, l'aménagement des cours d'eau et l'énergie, de même que de l'ordonnance relative à la loi fédérale sur la pêche.
- > Adaptation du règlement d'eau en 2014.
- > Mise en application de la directive-cadre européenne pour le domaine de l'eau qui fixe des objectifs concernant l'assainissement des cours d'eau d'ici à fin 2015.
- > Mesures volontaires.
- > Accords et négociations avec les organisations environnementales et les pêcheurs.

Les différentes études réalisées et en cours permettront vraisemblablement d'apporter un soutien scientifique important lors des futures réflexions menées sur l'exploitation des centrales hydroélectriques du Doubs franco-suisse.

7. PHYSICO-CHIMIE

7.1 Généralités

L'Eawag (Institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF) présente dans sa revue bisannuelle 2009 une introduction très intéressante sur les polluants des eaux¹⁵. Celle-ci est reprise partiellement ci-après.

Imaginer aujourd'hui une vie sans produits chimiques paraît bien difficile. En effet, qu'il s'agisse de composés industriels, de pesticides et biocides, de substances pharmaceutiques et vétérinaires, de produits d'entretien, de cosmétiques ou encore de retardateurs de flamme intégrés aux meubles et ordinateurs, ils sont partout. A cela viennent s'ajouter les toutes nouvelles nanoparticules déjà présentes dans plus de 800 produits - un marché en très forte croissance. Malgré des propriétés très diverses, bon nombre de ces substances chimiques ont un point commun : elles finissent tôt ou tard par se retrouver dans le milieu aquatique. Le nombre de composés a fortement augmenté ces dernières années. Approximativement 140'000 composés ont été mis en vente en Suisse depuis 1969, alors que plus de 47 millions de substances - naturelles ou synthétiques, organiques ou inorganiques - sont actuellement recensées dans la banque de données du « Chemical Abstract Service » (CAS) de la Société américaine de chimie. L'augmentation de la production chimique mondiale est tout aussi impressionnante : si elle était de 1 million de tonnes en 1930, elle atteint aujourd'hui plus de 300 millions de tonnes annuelles. L'évaluation des effets de ces composés dans l'hydrosystème est extrêmement complexe. En effet, les micropolluants se présentent généralement dans le milieu sous la forme de mélanges de composition inconnue dont les effets à long terme sont difficiles à mettre en évidence et peuvent, de plus, être masqués par d'autres facteurs de stress comme le rayonnement ultraviolet, la température ou les attaques de pathogènes. En plus, les pollutions chroniques ne sont pas distribuées de façon homogène ni dans le temps ni dans l'espace et peuvent au contraire présenter de très fortes variations. Dans le bassin du Doubs neuchâtelois, la population et les activités industrielles sont presque exclusivement concentrées dans les agglomérations de la Chaux-de-Fonds et du Locle (cf. chapitre 5. Bassin versant), éloignées de plusieurs kilomètres du Doubs. Les flux de polluants de ces villes circulent principalement au travers de leurs stations d'épurations dont les rejets aboutissent dans deux affluents du Doubs : dans la Ronde pour la Chaux-de-fonds et dans la Rançonnière pour le Locle. C'est la raison pour laquelle il nous paraît utile de décrire brièvement ci-après ces installations de traitement des eaux usées, dans leurs situations actuelle et projetée.

Il est important de préciser que lors de la mise en place du traitement des eaux en Suisse dans les années 1970 et 1980, le traitement s'est axé sur l'évacuation des polluants organiques. Ce choix était basé sur l'état de la technique à l'époque, ainsi que sur les priorités découlant de l'état des eaux de surfaces et souterraines. Cela a permis à l'époque et permet encore de réduire considérablement la charge en matières organiques et en phosphore déversée dans les cours d'eau.

L'importance croissante des micropolluants et de leurs effets va provoquer dans les prochaines années l'adaptation des stations de traitements, mais pour le moment, les STEP ne sont pas encore en mesure de traiter ces polluants.

De plus, compte tenu de la difficulté d'épurer ces micropolluants, et donc du coût de réalisation et d'exploitation des installations, toutes les stations ne seront pas équipées pour traiter ces particules problématiques. Les stations à équiper seront définies par les cantons, en accord avec la confédération qui participera au financement des nouvelles installations. Il est déjà certain que La Chaux-de-Fonds fera partie des stations concernées. Pour le Locle et les Brenets, le cas devra probablement être discuté avec la confédération une fois les critères d'obligation de traitement définitivement fixés.

7.1.1 STEP de la Chaux-de-Fonds

La STEP de la Chaux-de-Fonds a été créée en 1975. Elle a été totalement rénovée entre 2001 et 2003. Durant ces travaux, la capacité de traitement a été augmentée à 55'000 équivalents-habitants (débit habitants + équivalents-habitants) et la qualité du traitement des eaux a été améliorée (traitement des matières en suspension et dénitrification notamment).

Elle est constituée d'ouvrages de prétraitement tels que dégrilleur, dessableur aéré, tamiseur fin. Le traitement biologique des eaux est réalisé dans des bassins dit de boues activées, soit des floccs bactériens en suspension dans l'eau alimentés en oxygène par des aérateurs. Le système de ces bassins permet un passage dans une zone anaérobie où d'autres bactéries assurent la dénitrification des eaux. Une décantation permet ensuite de soustraire les floccs bactériens d'énergie renouvelable par la production de biogaz utilisé sur place grâce à l'installation de deux couples chaleur-force qui assurent notamment le chauffage des bâtiments de la station. Les boues sont ensuite déshydratées et livrées à SAIOD pour élimination en usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM).

Le réseau d'évacuation des eaux de la ville de la Chaux-de-Fonds est principalement de type unitaire. Quelques zones de la ville sont équipées avec deux collecteurs (système séparatif), mais la séparation jusqu'au milieu récepteur n'est pas effective. La majorité des eaux sont ainsi aujourd'hui acheminées à la station d'épuration (STEP). Cette station est capable de traiter un débit de 550 l/s. Au-delà de cette limite et jusqu'à 2 m³/s, les eaux sont déversées dans un bassin d'eaux pluviales qui effectue une décantation et un dégrillage mécanique. Lorsque le bassin est plein, les eaux sont acheminées dans le ruisseau de la Ronde. Au delà de 2 m³/s, les eaux usées brutes s'écoulent directement dans la Ronde sans épuration. Ces volumes ne représentent pas plus que le 5% du débit annuel arrivant à la STEP (Jacques Vidal, com. orale). Dans ce cas de figure, les eaux usées sont proportionnellement diluées par les eaux de pluie. De plus, compte tenu de son système unitaire, la ville compte plusieurs déversoirs d'orage en amont de la STEP qui font que toutes les eaux ne sont pas acheminées jusqu'à la station en cas de grosse pluie et de saturation du système. Le développement de la ville en Ouest provoque une forte augmentation de ces débits (principalement en cas de pluie) dans les collecteurs du centre de la localité. Malgré des volumes de rétention mis en place dans les années 80, des refoulements, inondations et déversements dans la Ronde apparaissent lors d'orages importants (événements avec un temps de retour de 2 ans dans les secteurs les plus sensibles).

L'emposieu des Moulins dans lequel se jetaient les eaux usées de la ville de la Chaux-de-Fonds avant la construction de la STEP fonctionne encore comme point d'infiltration des eaux du déversoir d'orage, lorsque le débit de l'égout dépasse les 12 m³/s.

Face à ces problèmes récurrents et parallèlement au développement du système séparatif, diverses études ont été menées dès 2001 pour tenter de diminuer la quantité d'eaux claires entrant dans la STEP. Malheureusement, aucun projet n'a pu être concrétisé. Plusieurs pistes sont actuellement à l'étude. Il faut néanmoins relever qu'actuellement pour chaque tronçon mis en séparatif, (plusieurs tronçons de rue sont régulièrement réalisés) lors des travaux la présence de karst est recherchée et les eaux claires y sont directement conduites. La finalisation prochaine du plan général d'évacuation des eaux (PGEE) permettra entre autre de cibler au mieux les endroits où la réalisation de mesures appropriées fera diminuer le débit des eaux claires lors de pluies ou des eaux claires dites parasites. Ces modifications du réseau sont d'autant plus importantes que les années comme 2011, avec une pluviométrie faible mais des événements orageux importants pourraient devenir de plus en plus fréquents. Cet effet de "chasse" explique sans doute pourquoi, dans le tableau ci-dessous, les dépassements sont nombreux mais qu'en moyenne, les valeurs de rejets comme les rendements sont dans les normes.

Concernant le traitement des micropolluants, compte tenu du nombre d'habitants raccordés, la STEP de la Chaux-de-Fonds fera partie des STEP qui devront s'équiper pour diminuer les rejets de ces substances. En plus de l'effet sur les micropolluants, l'ajout d'un traitement supplémentaire devrait entraîner une amélioration de certains autres paramètres physico-chimiques.

Grâce à sa rénovation en 2003, la STEP a déjà permis d'améliorer notablement la qualité des eaux traitées. Des analyses sont réalisées régulièrement par le canton (environ 4x par années) et un autocontrôle (1 à 2 analyses par semaine suivant les paramètres) a été mis en place en 2009 qui permet de surveiller de près les rendements et la qualité des rejets dans la Ronde. Le tableau ci-après présente les rendements et les rejets moyens pour les années 2010 et 2011. A noter que le canton ne demande pas le COD en autocontrôle et que cette exigence (tant pour le rendement que pour la valeur de rejet) n'est pas intégrée aux normes cantonales.

Il est important de préciser que la norme fédérale concernant le rejet d'ammonium ne s'applique que pour les périodes où la température est en dessus de 10°C (OEaux, annexe 3), les bactéries nécessaires à la transformation des composés azotés en azote gazeux s'adaptent mal aux températures trop basses. Or, la STEP est située à environ 1000m d'altitude, qui plus est au fond d'un vallon où le soleil pénètre peu en hiver. Aussi, la période où la nitrification est difficile est malheureusement relativement longue, ce qui explique les résultats inégaux de la station en la matière, et donc les nombreux dépassements venant de la période hivernale.

2010	Rendement d'épuration	Exigence de rendement OEaux	Charge entrée	Charge sortie	Valeur rejet moyen sortie	Exigences cantonales	Exigences OEaux	Nb. d'analyses	Nb. de dépassements	Nb. de dépassements autorisés (OEaux)
			kg/j	kg/j	mg/l	mg/l	mg/l			
DBO ₅	97%	90%	2874	107	7.1	10	15	51	2	5
DCO	92%		5355	464	33					
COD	67%	85%	420	109	7.2		10	5	1	1
Ptot	85%	80%	62	7	0.5	0.8	0.8	56	6	6
NH ₄	97%	90%	327	25	1.6	2	2	97	27	9
Nitrates			62	219	14.4					
MES					8.4	10	15	127	6	11

2011	Rendement d'épuration	Exigence de rendement OEaux	Charge entrée	Charge sortie	Valeur rejet moyen sortie	Exigences cantonales	Exigences OEaux	Nb. d'analyses	Nb. de dépassement	Nb. de dépassements autorisés (OEaux)
			kg/j	kg/j	mg/l	mg/l	mg/l			
DBO ₅	97%	90%	2928	101	7.2	10	15	53	1	5
DCO	92%		5826	454	32.3					
COD	67%	85%	450	147	10.4		10	6	3	1
Ptot	85%	80%	66	10	0.7	0.8	0.8	96	29	9
NH ₄	93%	90%	336	23	1.6	2	2	92	21	8
Nitrates			53	205	14.6					
MES					11	10	15	134	21	11

Tableau 8 Rendements et rejets moyens pour les années 2010 et 2011. Les chiffres présentés dans ce tableau sont tirés des analyses en autocontrôle, plus nombreuses que les analyses cantonales, à l'exception du COD, qui n'est pas demandé aux STEP pour l'autocontrôle et qui est donc tiré des analyses du service cantonal de l'énergie et de l'environnement (SENE). Habitants raccordés : 37'580 (en 2010) / Débit moyen 2010: 15'159 m³/j / Débit moyen 2011: 14'069 m³/j.

7.1.2 STEP du Locle

La station d'épuration du Locle implantée au Col des Roches a été construite en 1970 et fonctionne depuis plus de 40 ans. Prévue pour 20'000 équivalents-habitants, elle est constituée d'un relevage important des eaux brutes, d'ouvrages de prétraitement tels que dégrilleur, dessableur aéré et tamiseur fin. Le traitement biologique des eaux est réalisé au moyen de 2 Monoblocs Schreiber équipés de lits bactériens sans nitrification. Le traitement des boues est réalisé dans 2 digesteurs à froid équipé d'une déshydratation puis livrées à livrées à SAIOD pour élimination usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM).

Des travaux ont été réalisés pour modifier les ouvrages d'entrée en 2004 et sur le traitement des boues en 1998. Actuellement, le traitement des eaux n'offre pas des résultats suffisants et de gros travaux seraient nécessaires à moyen ou court terme pour une remise en état. La partie maçonnerie des monoblocs nécessiterait une vérification complète et peut-être une reconstruction partielle pour pouvoir assurer leur maintien à long terme.

L'apport d'eaux parasites perturbe considérablement le bilan de l'épuration. Les eaux épurées et les eaux excédentaires déversées par temps de pluie dans le Bied du Locle avant la galerie de la Raçonnière provoquent des nuisances importantes dans l'exutoire et, tout particulièrement, dans le vallon de la Raçonnière, dans le marais de Goudebass et le lac des Brenets.

Le PGEE, réalisé en 1995 et complété en 2002, a montré qu'une grande quantité d'eaux claires entre dans les canalisations d'assainissement et arrive à la STEP. A l'époque de l'étude, la majorité de la commune était en système unitaire et de plus, des eaux claires dites parasites (trop pleines des nappes sous la ville par exemple) pénétraient également dans le réseau. Depuis, une douzaine de projets tendant à améliorer la situation tant au niveau des eaux claires que des eaux usées ont été réalisés, notamment la construction d'un système de traitement des eaux complémentaire à la STEP. Néanmoins, la réfection d'un système d'assainissement est un travail coûteux et de longue haleine, il reste donc encore de nombreux changements à effectuer. Force est de constater que malgré ces améliorations constantes, les débits mesurés à la STEP en 2010 et 2011 sont encore supérieurs au débit moyen de la STEP relevé dans le complément du PGEE de 2002 (débit calculé sur la période 1985-1995).

Par temps sec, le fait de turbiner les eaux du Bied du Locle supprime temporairement l'apport d'eau minimum dans la Raçonnière et, lors du turbinage, les sédiments provoqués par le mauvais rendement de l'épuration et par la rétention créent un apport de boues important et momentané, en fin de turbinage. Les normes de rejet ne sont pas respectées et l'installation ne dispose pas d'une dénitrification, même si celle-ci se fait en partie naturellement durant l'été. Le bilan actuel de l'épuration est très préoccupant.

L'inauguration en 2011 d'une installation de traitement complémentaire à la STEP par un système dit Actiflo permet d'améliorer la qualité des eaux dans la Raçonnière.

L'Actiflo est un système de décantation. Le rendement de cette décantation est maximisé par plusieurs interventions sur les eaux. Celles-ci reçoivent l'adjonction de produits coagulants, de micro-sable pour lester les amas coagulés et de polymères pour augmenter encore l'agglomération et la décantation rapide des polluants, ceci dans trois bassins successifs. Une fois le mélange avec les divers additifs réalisé, l'eau passe par refoulement dans un décanteur dont la surface de capture des agglomérats a été augmentée par la pose de grandes lames inclinées (décanteur lamellaire). L'eau clarifiée est ensuite rejetée, ici dans le Bied ou à la STEP en fonction du réglage.

Des problèmes survenus lors de la mise en route de cette installation ne permettent pas encore de tirer un bilan de l'impact de cette solution, mais la souplesse offerte dans le traitement des débits a déjà permis une exploitation facilitée de la STEP. L'Actiflo est installé sur un réseau parallèle à la STEP, ainsi, les débits peuvent être dirigés soit sur la STEP, soit

sur l'Actiflo, soit sur les deux à la fois suivant un taux de répartition choisi. Les eaux sortant de l'Actiflo peuvent encore être dirigées sur la STEP au besoin.

Pour le moment, la moyenne de rendement de l'Actiflo est de 80% sur la DBO₅, 79% sur le Ptot et 59% sur la DCO. Les exigences de rendements pour cette installation sont de 80% en DBO₅, 80% pour le Ptot et 65% pour la DCO. Ceci pour la période entre novembre 2011 et mai 2012 (chiffres : autocontrôle, STEP du Locle juin 2012). Durant cette période, plusieurs incidents ont malheureusement fait baisser l'efficacité de l'Actiflo qui, prévu pour fonctionner par bâches successives (notamment un temps de maturation pour laisser les polymères agir), a dû la plupart du temps marcher en continu (mode "Multiflo", le temps de passage est diminué et l'eau circule en continu) ce qui a eu un impact négatif sur les rendements et les possibilités d'exploitation de l'installation. Les problèmes étant en passe d'être résolus, la qualité des rejets devrait être beaucoup plus régulière dès la mi-2012.

2010	Rendement d'épuration	Exigence de rendement OEaux	Charge entrée kg/j	Charge sortie kg/j	Valeur rejet moyen sortie mg/l	Exigences cantonales mg/l	Exigences OEaux mg/l	Nb. d'analyses	Nb. de dépassements	Nb. de dépassements autorisés (OEaux)
DBO ₅	84%	90%	1062	170	22.3	20	15	31	20 (15 si 20 mg/l)	4
DCO	82%		1534	276	36.1					
COD	64%	85%	130	47	6.2		10	8	1	2
Ptot	72%	80%	18	5	0.7	0.8	0.8	31	14	4
MES					17.7	20	15	31	21 (10 si 20mg/l)	4

2011	Rendement d'épuration	Exigence de rendement OEaux	Charge entrée kg/j	Charge sortie kg/j	Valeur rejet moyen sortie mg/l	Exigences cantonales mg/l	Exigences OEaux mg/l	Nb. d'analyses	Nb. de dépassements	Nb. de dépassements autorisés (OEaux)
DBO ₅	83%	90%	811	140	24	20	15	31	23 (22) *	4
DCO	82%		1557	284	48.7					
COD	57%	85%	105	45	7.7		10	8	1	2
Ptot	80%	80%	20	4	0.7	0.8	0.8	31	9	4
MES					19	20	15	31	21 (13)	4

*Deux dépassements de DBO₅ dans l'année sont au dessus de la valeur maximale admissible qui est de 40mg/l

Tableau 9 Les chiffres sont tirés des analyses en autocontrôle, plus nombreuses que les analyses cantonales, à l'exception du COD, qui n'est pas demandé aux STEP pour l'autocontrôle et qui est donc tiré des analyses du service cantonal de l'énergie et de l'environnement (SENE). Habitants raccordés : 10'052 (en 2010) / Débit moyen 2010: 7'638 m³/j / Débit moyen 2011: 5'828 m³/j.

Exigences légales fédérales selon OEaux annexe 3 : Les normes fédérales changent pour les installations de plus de 10'000 EH, la STEP étant à la limite, le canton a conservé les normes pour les STEP de moins de 10'000 EH dans l'attente de la nouvelle installation.

7.1.3 STEP des Brenets

La station d'épuration des Brenets a été construite en 1970 et des travaux d'amélioration ont été réalisés en 1989 et 1990. Dimensionnée pour 1900 équivalents-habitants, elle est constituée d'ouvrages de prétraitement, tels que dessableur aéré et dégrilleur. Le traitement biologique des eaux est réalisé au moyen d'un Monobloc Schreiber équipé d'un lit bactérien sans nitrification. Le traitement des boues est réalisé dans un digesteur à froid puis elles sont livrées à la STEP du Locle pour déshydratation avant l'incinération en UIOM. Les eaux épurées sont évacuées à l'extrémité du marais des Goudebas, proche du lac des Brenets. Le bilan de l'épuration peut être considéré comme bon avec des rendements de plus de 90%. Les eaux épurées qui sont déversées directement dans le marais des Goudebas créent des nuisances à ce biotope, particulièrement durant les périodes de pluie du fait de la surcharge de la STEP et de la mise en charge du déversoir d'orage à l'entrée de celle-ci.

Le PGEE, réalisé en 2004, montrait que la STEP traitait un volume d'eau trop important dû à la présence d'eaux claires dans les canalisations d'eaux usées. Une partie du village étant déjà en séparatif, les mesures principales tendaient à l'extension du séparatif à tout le village et à la réfection des canalisations dont l'étanchéité insuffisante permettait l'arrivée d'eaux claires parasites. Plusieurs projets ont été réalisés concernant des collecteurs d'eaux claires, permettant d'étendre le séparatif, mais les débits mesurés à la STEP montrent que les travaux doivent se poursuivre.

Un autre point important du PGEE était la réalisation d'une épuration pour la zone du Saut-du-Doubs, assainissement réalisé en 2006 et terminé en 2008.

2010	Rendement d'épuration	Exigence de rendement OEaux	Charge entrée	Charge sortie	Valeur rejet moyen sortie	Exigences cantonales	Exigences OEaux	Nb. d'analyses	Nb. de dépassements	Nb. de dépassements autorisés (OEaux)
			kg/j	kg/j	mg/l	mg/l	mg/l			
DBO ₅	96%	90%	139	5	9.9	20	20	11	0	2
DCO	93%		348	23	45.4					
Ptot	93%	80%	3	0.2	0.4	0.8	0.8	11	1	2
MES					16.3	20	20	11	2	2

2011	Rendement d'épuration	Exigence de rendement OEaux	Charge entrée	Charge sortie	Valeur rejet moyen sortie	Exigences cantonales	Exigences OEaux	Nb. d'analyses	Nb. de dépassements	Nb. de dépassements autorisés (OEaux)
			kg/j	kg/j	mg/l	mg/l	mg/l			
DBO ₅	96%	90%	53	2	5.3	20	20	6	0	1
DCO	93%		193	14	36.9					
Ptot	90%	80%	2	0.2	0.5	0.8	0.8	6	0	1
MES					14.2	20	20	6	1	1

Tableau 10 Les chiffres sont tirés des analyses en autocontrôle, plus nombreuses que les analyses cantonales, à l'exception du COD, qui n'est pas demandé aux STEP pour l'autocontrôle et qui est donc tiré des analyses du service cantonal de l'énergie et de l'environnement (SENE). Les chiffres 2011 sont tirés des analyses effectuées par le SENE, les chiffres de l'autocontrôle n'étant pas encore disponibles. Habitants raccordés : 1'200 (en 2010) / Débit moyen 2010 : 507m³/j / Débit moyen 2011 : 379m³/j.

7.1.4 Projet d'assainissement

Le projet retenu pour améliorer le traitement des eaux du Locle et des Brenets consiste à centraliser les 2 unités de traitement actuelles en une nouvelle installation aux Brenets. Cette nouvelle station d'épuration sera conçue pour nitrifier et dénitrifier et sera équipée d'une installation de traitement des micropolluants selon les normes actuellement en consultation. Le concept sera défini en fonction des exigences mentionnées ci-dessus et des qualités particulières pour les charges en DCO (27'000 EH). Les avantages environnementaux du projet sont les suivants :

- > Exigences plus importantes en matière de traitement des eaux pour une STEP de 18'000 EH.
- > Réduction importante de la consommation d'énergie grâce au turbinage, à la récupération d'énergie thermique et électrique et aux économies d'échelles réalisables pour une STEP de capacité importante.
- > Ce concept ne nécessite plus de transports de boues liquides des Brenets au Locle.
- > La nouvelle STEP sera implantée sur le site de la STEP des Brenets dans une ancienne carrière qui permettra de limiter les nuisances et dissimuler l'installation.
- > Progressivement le cours d'eau de la Rançonnière, et le marais des Goudebas subiront de moins en moins d'apports d'eau « sales » du fait que l'ensemble des eaux épurées seront rejetées directement dans le lac des Brenets et que l'ancien traitement des eaux permanentes et pluviales du Locle (ACTIFLO) sera affecté aux eaux pluviales lorsque le réseau de canalisation sera en système séparatif (2030).
- > La nouvelle STEP sera probablement soumise au traitement des micropolluants, ce qui améliorerait encore la qualité des rejets. Le projet de 2010 en prévoit l'installation dans le budget estimatif.

7.2 Suivis et données existantes

7.2.1 Données suisses

Le suivi de la qualité physico-chimique du bassin neuchâtelois est constitué d'un réseau de 14 stations permanentes où en général, 3 à 4 séries de mesures sont réalisées sur un cycle annuel pour les paramètres suivants :

- T°C	- PH	- Conductivité	- Oxygène dissous
- Chlorures	- COD	- MES	- Orthophosphates
- Phosphore total	- Nitrites	- Nitrates	- Ammonium

Tableau 11 Liste des paramètres contrôlés systématiquement sur les stations de suivi.

Précisons que les teneurs en micropolluants tels que les pesticides sont suivis systématiquement depuis 2005. Des analyses des sédiments sont effectuées très ponctuellement et visent en général à mettre en évidence la présence de certains groupes de polluants. En 2011, 9 stations complémentaires ont fait l'objet de prélèvements puis d'analyses détaillées. Rappelons que plusieurs stations sont difficilement accessibles et ne peuvent être traitées, pour des raisons de sécurité, que sous certaines conditions (météo, accès plans d'eau, débits, etc.). Comme le montre le tableau suivant, la fréquence des échantillonnages et analyses réalisés au niveau du bassin du Doubs Neuchâtelois est variable et les campagnes de prélèvements sont distribuées de manière irrégulière dans le temps et les saisons (la plupart du temps 2 échantillonnages printaniers et 2 échantillonnages automnaux sont réalisés).

	Stations						
	2401 Refrain TCC	2402 La Ronde	2403 Pont Biaufond	2404 La Rasse	2405 Saut du Doubs	2406 Rançonnière	2407 Clos Randot
1993	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □
1994	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □
1995	(3) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □		(4) ● □	(4) ● □
1996	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □	(4) ● □
1997				(4) ● □			
1998				(4) ● □			
1999				(4) ● □			
2000				(4) ● □ ★			
2001				(4) ● □ ★			
2002				(4) ● □ ★			
2003				(4) ● □ ★			
2004			(4) ● □	(4) ● □ ★			
2005	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(9) ● □ ★
2006			(3) ● □ ★	(3) ● □ ★			
2007			(4) ● □ ★	(4) ● □ ★			
2008	(4) ● □ ★		(4) ● □ ★	(4) ● □ ★	(3) ● □ ★		
2009							(5) ● □ ★
2010			(5) ● □ ★				
2011	(8) ● □ ★	(10) ● □ ★	(12) ● □ ★	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(10) ● □ ★	(12) ● □ ★

- Légende:
- (i) i nombre de mesures par années
 - Nutriments (Ortho-phosphates, Ammonium, Nitrates, etc...)
 - Propriétés physiques (pH, Temperature eau, Silicium, Dureté, etc...)
 - ★ Autres (Micropolluants, Pesticides, etc...)

Tableau 12 Synthèse des échantillonnages réalisés sur le Doubs Neuchâtelois.

Ces fréquences correspondent à des échantillonnages ponctuels, plus rarement saisonniers au sens du guide méthodologique d'analyse et d'appréciation des cours d'eau de la Confédération¹⁵. Ce procédé permet de bénéficier d'un résultat instantané précis en réaction à des événements déterminés. Toutefois, celui-ci est insuffisant pour évaluer un régime annuel et mettre en évidence les événements de courte durée. La fréquence d'échantillonnage pour parvenir à établir un suivi de la qualité des eaux est théoriquement de minimum 12 mesures annuelles selon les recommandations fédérales (op. cit.).

Ainsi, sur le Doubs, bien que les données suisses disponibles soient relativement nombreuses (plusieurs milliers depuis 1993), elles s'apparentent plus à des sondages qu'à des données de suivis. Précisons que seule la station cantonale n°2404 au lieu-dit « Pont de la Rasse » a été échantillonnée presque chaque année (hormis 2009 et 2010). En revanche, aucune autre station du Doubs neuchâtelois n'a fait l'objet de mesures physico-chimiques entre les années 1997 et 2003.

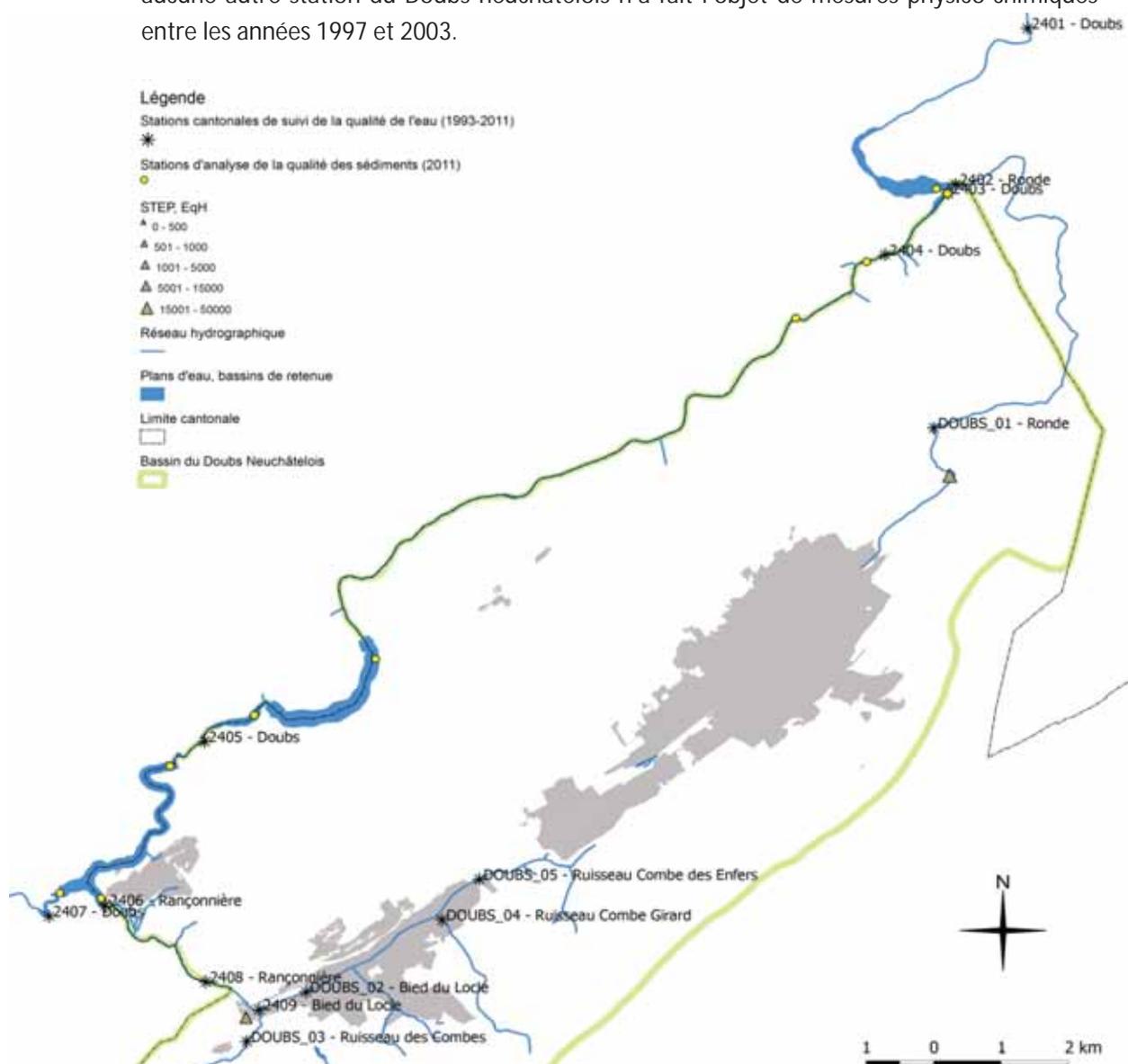


Figure 31 Stations neuchâteloises de suivi de la qualité des eaux et des sédiments du bassin du Doubs. La station n° 2406 se situe en faciès lotique, ce qui la distingue de la station proche de prélèvement des sédiments lacustres.

15 Liechti Paul 2010: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments. L'environnement pratique n°1005. Office fédéral de l'environnement, Berne. P 34.

7.2.2 Données françaises

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), adoptée le 23 Octobre 2000 et transposée en droit français le 21 avril 2004, un programme de surveillance a été mis en place au niveau français afin de suivre les états écologique et chimique des eaux douces de surface (cours d'eau et plans d'eau). Le Doubs possède 2 stations de suivi sur la partie lotique proche du territoire neuchâtelois, l'une à Morteau (en amont des Brenets) et l'autre à Goumois environ 15 kilomètres à l'aval du barrage du Refrain.

Eléments suivis	Périodicité du suivi par plan de gestion (année)	Fréquence du suivi par année	Calendrier	Sites
Micropolluants : substances prioritaires	2	Eau : 12 / an Sédiments : 1 / an	1 ^{ère} année, analyser toutes les substances de l'annexe 3, puis analyser celles qui posent problème	Tous
Micropolluants : autres substances (substances dites pertinentes) et pesticides	2	Eau : 4 / an Sédiments : 1 / an	Démarrage en 2007	25%
Macropolluants	6	6	Démarrage en 2007	Tous

Tableau 13 Extrait du réseau de contrôle de surveillance de l'état qualitatif des eaux de surface. Informations fournies par le Système d'Information sur l'Eau (SIE) du bassin Rhône-Méditerranée.

Les plans d'eau suivants sont situés sur ou à proximité du territoire neuchâtelois et font partie du réseau de surveillance de l'état qualitatif des eaux de surface :

- > Lac de Chaillexon (partie française du lac des Brenets).
- > Retenue de Moron (barrage du Châtelot).

Les indicateurs suivants sont utilisés pour réaliser et suivre la qualité des plans d'eau :

- > Investigations physicochimiques ;
- > étude des peuplements phytoplanctoniques ;
- > étude des peuplements d'oligochètes ;
- > étude des peuplements de mollusques ;
- > évaluation morphologique du lac ;
- > étude des peuplements de macrophytes sur plan d'eau.

De plus, Electricité de France (EDF) a mandaté le bureau ECOTEC pour réaliser courant 2009 des investigations sur la qualité chimique des sédiments de la retenue du Refrain (Biaufond)¹⁶.

¹⁶ ECOTEC, 2010 : Barrage du Refrain (Doubs), Optimisation de la gestion de la retenue du de la valeur écologique du site.

7.3 Méthodes utilisées pour le diagnostic

L'appréciation de la qualité des eaux de surface et des sédiments n'est pas « normée » en Suisse ou au niveau neuchâtelois. Il existe plusieurs outils de diagnostic aux échelles nationale et internationale qui reposent sur des valeurs de références et des comparaisons parfois significativement différentes en fonction des fractions considérées, des méthodes d'analyses employées et des objectifs visés.

Il existe de plus de nombreuses substances telles que les micropolluants et les pesticides pour lesquels des valeurs de référence sont à l'étude et font l'objet de recherches poussées dans les laboratoires d'écotoxicologie des écoles polytechniques fédérales par exemple.

Le présent rapport pose un diagnostic basique de l'état physico-chimique du Doubs et emploie pour y parvenir des outils développés par la Confédération et également les références les plus largement utilisées en Suisse. Il s'agit d'une analyse sommaire où les domaines complexes du risque écotoxicologique par exemple ne sont pas traités.

7.3.1 En Suisse

7.3.1.1 *Stations d'échantillonnage de la qualité des eaux*

Le Service de l'énergie et de l'environnement (SENE) est notamment chargé de la surveillance de la qualité des eaux dans le canton de Neuchâtel. Débuté en 1983, ce réseau de surveillance qui comptait initialement 9 stations comprend aujourd'hui 60 points d'observations systématiques. Au moins 14 de ces points sont dévolus au suivi du bassin du Doubs.

Dans le prolongement notamment des mortalités piscicoles observées dans le Doubs et qui avaient alerté les autorités neuchâteloises et jurassiennes en 2010, différentes analyses de l'eau, des algues ainsi que sur des poissons avaient été menées. A l'instar des associations de protection de la nature et des pêcheurs, cette situation continue de préoccuper le SENE, qui a intensifié en 2011 le rythme de ses campagnes d'analyses et qui a procédé également à des investigations complémentaires devant servir à la présente étude de diagnostic détaillé du Doubs et de ses affluents. Cette intensification s'inscrit également dans le contexte des recherches, suivis et travaux menés par la Suisse et la France pour l'amélioration de la qualité des eaux du Doubs.

Rappelons qu'une instance de gouvernance du Doubs a été formée le jeudi 12 mai 2011 à Besançon (F), qui a pour but de se consacrer à l'amélioration de la qualité des eaux du Doubs. Ce groupe binational pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques a été fondé sur la base de l'arrangement du 11 février 2008. La Suisse est représentée par les Offices fédéraux de l'environnement et de l'agriculture ainsi que par les cantons riverains du Doubs (Jura, Neuchâtel et Berne). Des experts de la pêche et du projet de Parc naturel régional frontalier du Doubs participent également aux travaux.

Les paramètres standards de la physico-chimie des eaux sont analysés par le laboratoire du SENE. Les paramètres particuliers tel que la recherche de cyanotoxines par exemple sont confiés par mandat à des ressources externes.

7.3.1.2 Stations d'échantillonnage de la qualité des sédiments

Les sédiments ont fait l'objet de prélèvements par carottage en plongée ou depuis un bateau à l'aide d'une benne « Eckmann ». La profondeur de sédiments prélevés est de 5 à 10 cm environ. Le nombre de prélèvements par station est fonction de la quantité de sédiments en place, le but étant de mélanger le contenu des bennes pour obtenir une masse d'approximativement 1 litre. Les échantillons sont conservés au frais et transférés en principe le jour même au laboratoire.

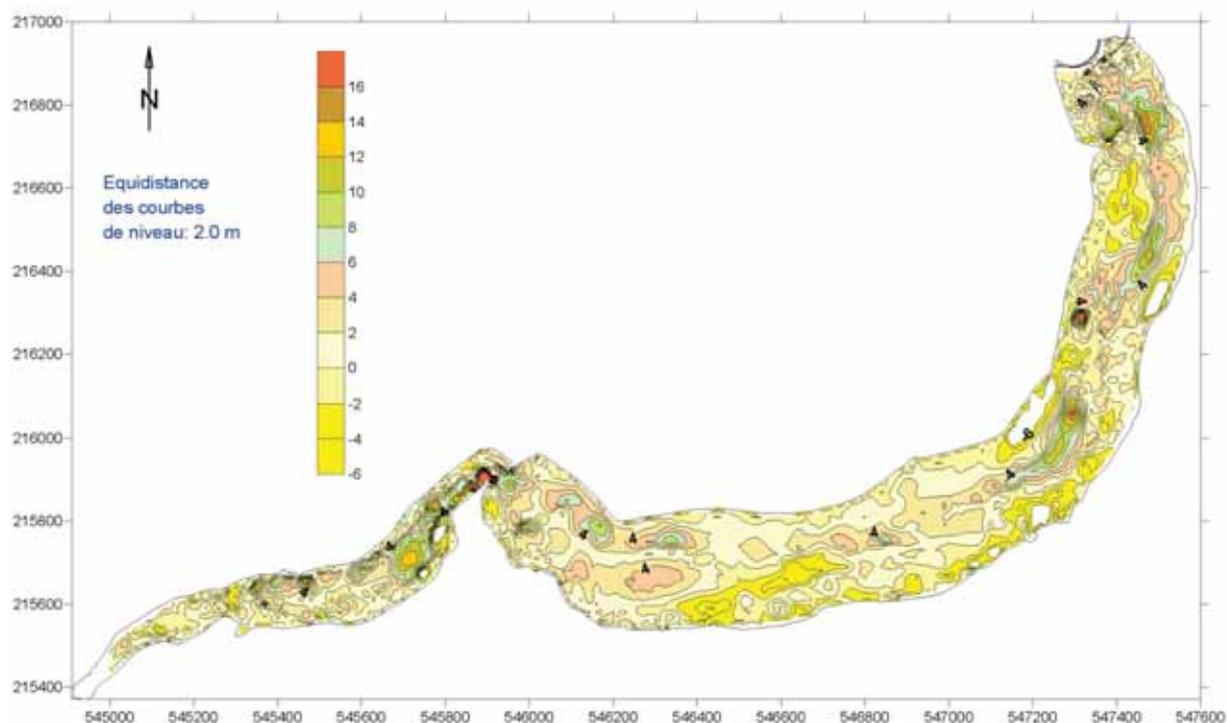


Figure 32 Répartition des sédiments accumulés depuis la construction du barrage jusqu'en 2006 – épaisseurs en mètres¹⁷. Cette carte a été employée pour déterminer les sites les plus pertinents devant faire l'objet de prélèvements de sédiments.

7.3.1.3 Critères et valeurs de références pour les évaluations

Il n'existe pas de méthodologie cantonale d'appréciation de la qualité des eaux et des sédiments du Doubs (critères, seuils, etc.). De manière générale, la publication de Liechti, 2010¹⁸ est la plus largement utilisée au niveau cantonal pour le suivi de la qualité des eaux de surface. Celle-ci s'inscrit dans le cadre légal fédéral de protection des eaux qui est complété par des méthodologies de suivi et d'appréciation systématique des écosystèmes aquatiques (système modulaire gradué).

Concernant l'évaluation de la qualité des sédiments, il n'existe pas de méthodologie standardisée en Suisse. Nous avons dans la présente étude employé les valeurs de référence

¹⁷ Groupe E, 2006 : Lac de Moron, Barrage du Châtelot, levés bathymétriques.

¹⁸ Liechti Paul 2010: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments. L'environnement pratique n°1005. Office fédéral de l'environnement, Berne. 44 p.

de l'OSol¹⁹ et de la CIPR²⁰, car comme le montre la figure ci-après, elles sont actuellement les plus largement utilisées, ceci bien que ne considérant pas les mêmes fractions granulométriques²¹. La comparaison des évaluations doit par conséquent être faite avec réserve.

Les valeurs écotoxicologiques TEC (Threshold Effect Concentration) et PEC (Probable Effect Concentration) de MacDonald, 2000²² – *valeurs écotoxicologiques de substances (8 métaux, HAPs et PCBs) sur des organismes aquatiques et benthiques* - ont également été utilisées.

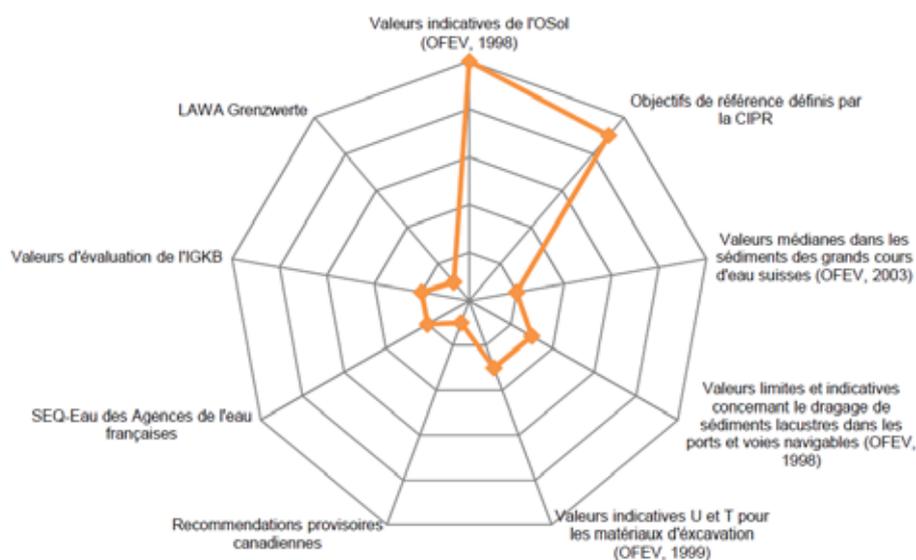


Figure 33 Utilisation de « valeurs de référence » par treize cantons analysant/ayant déjà analysé des sédiments en place (une graduation signifie une occurrence du critère par canton). D'après EAWAG, 2011²³.

7.3.2 En France

La méthodologie employée pour étudier les indicateurs de qualité est notamment décrite dans le rapport de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse concernant les suivis annuels 2010 des plans d'eau²⁴.

Les prélèvements de sédiments sont réalisés lors d'une seule campagne, celle de fin d'été (septembre), susceptible de représenter la phase la plus critique pour ce compartiment.

¹⁹ Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). No. RS 814.12. Berne, Suisse.

²⁰ Commission Internationale de Protection du Rhin.

²¹ Pour la CIPR, les objectifs sont définis pour les sédiments fins (63 µm) alors que pour l'OSol, les valeurs indicatives ont été déterminées sur l'ensemble des particules de taille inférieure ou égale à 2 mm.

²² MacDonald, D.D., C.G. Ingersoll, and T.A. Berger, 2000 : Development and evaluation of consensusbased sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 39:20-31.

MacDonald, D.D., L.M. Dipinto, J. Field, C.G. Ingersoll, and E.R. Long, 2000 : Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for polychlorinated biphenyls. Environ. Toxicol. Chem. 19:1403-1413.

²³ Centre suisse d'écologie appliqué, EAWAG-EPFL, Juillet 2011 : Surveillance de la qualité des sédiments en Suisse : Synthèse d'un questionnaire. Deuxième rapport dans le cadre du projet "Évaluation de la qualité des sédiments en Suisse"

²⁴ Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, septembre 2011 : Etude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône-Méditerranée Corse : Méthodologie et déroulement des investigations : suivi annuel 2010.

Pour ce faire, une série d'échantillons ont été prélevés à la benne « Eckmann ». Au vu de la taille des échantillons et de la fraction ramenée par ce type de benne (en forme de secteur angulaire), on réalise de 2 à 5 prélèvements pour ramener une surface de l'ordre de 1/10 m². Les tranches superficielles des 5 premiers cm sont alors sélectionnés, mélangés de façon homogène pour l'analyse en laboratoire.

Pour les cours d'eau, un prélèvement sur chacune des rives et un prélèvement au centre du chenal sont en principe effectués. Si le site est pauvre en sédiment, on multipliera le nombre de prélèvements jusqu'à remplir le flacon.

7.4 Résultats

Rappelons en préambule que les résultats présentés ci-après constituent des mesures instantanées ponctuelles. Elles ne sont la plupart du temps pas représentatives d'une situation globale et ne mettent pas non plus systématiquement en évidence des pollutions ponctuelles par exemple. Précisons que les variations journalières du débit, de la température, la modification de l'ensoleillement, les activités humaines contribuent à des fluctuations plus ou moins marquées des substances contenues dans les eaux. La concentration d'ammonium, par exemple, peut changer de plusieurs centaines de pourcents au cours d'une seule et même journée.

7.4.1 Nutriments dans les eaux courantes

Les graphiques ci-après se concentrent sur le réseau cantonal de stations de mesures physico-chimiques. Seules les stations situées sur le Doubs et ses principaux affluents neuchâtelois, la Ronde et la Raçonnière sont évaluées. En effet, les autres cours d'eau du bassin du Doubs neuchâtelois convergent dans les deux ruisseaux précités.

On constate que la Ronde et la Raçonnière présentent une qualité d'eau qui est fréquemment mauvaise du point de vue des nutriments. Cette situation n'est pas surprenante car une bonne partie, voir la majorité des eaux de ces ruisseaux est constituée des rejets des stations d'épuration des villes de La Chaux-de-Fonds et du Locle. L'ammonium et les nitrites atteignent ponctuellement des valeurs toxiques à court terme pour la faune piscicole. La station de Clos-Randot située sur le Doubs français à l'amont du lac des Brenets est celle qui présente les concentrations en nutriments les plus élevées. Plusieurs mesures classaient cette station entre 1993 et 1998 dans les catégories d'appréciation médiocre et mauvaise. La fréquence de ces événements a significativement diminué par la suite. On constate de manière générale sur le Doubs neuchâtelois des valeurs correspondant à des apports excédentaires en nutriments pouvant ponctuellement devenir importants et problématiques, typiquement lors d'un mauvais fonctionnement de station d'épuration ou/et lors de conditions d'étiage prolongé par exemple.

De fortes concentrations en carbone organique dissous se rencontrent naturellement en particuliers à l'aval des émissaires de marais ou de plan d'eau et n'indiquent ainsi pas nécessairement une perturbation d'origine anthropique.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	Ammonium [mg N/L] (>10°C ou pH> 9)	Ammonium [mg N/L] (<10 °C)
très bon	jusqu'à < 0.04	jusqu'à < 0.08
bon	0.04 à < 0.2	0.04 à < 0.4
moyen	0.2 à < 0.3	0.2 à < 0.6
médiocre	0.3 à < 0.4	0.3 à < 0.8
mauvais	0.4 et plus	0.8 et plus

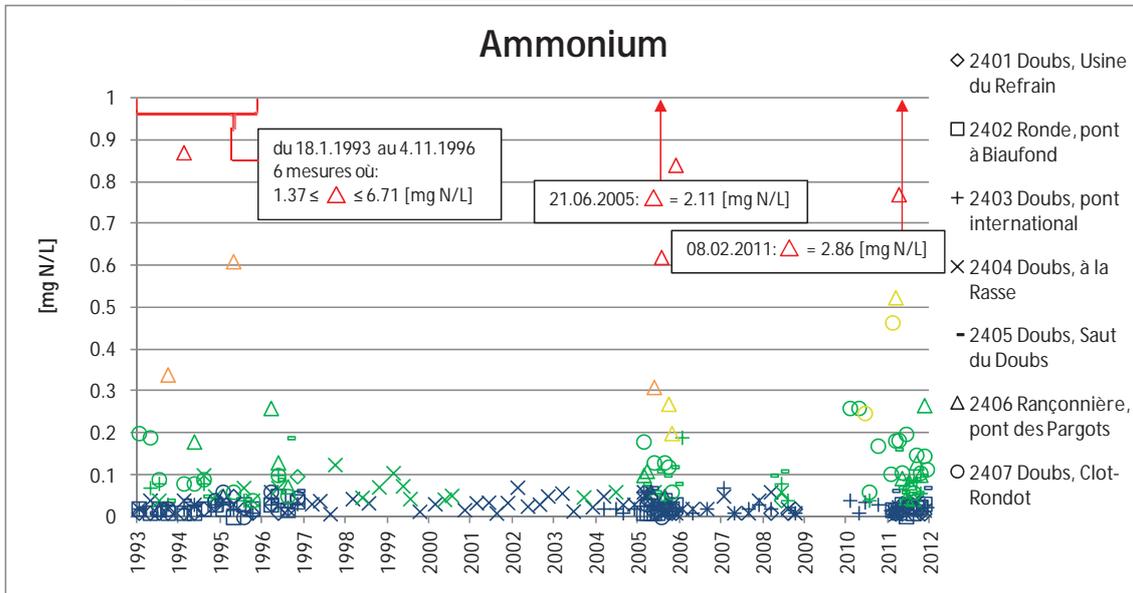


Figure 34 Concentrations instantanées en ammonium mesurées entre 1993 et 2011.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	Nitrites [mg N/L] (<10 [mg Cl-/L])	Nitrites [mg N/L] (10 à 20 [mg Cl-/L])	Nitrites [mg N/L] (>20 [mg Cl-/L])
très bon	jusqu'à < 0.01	jusqu'à < 0.02	jusqu'à < 0.05
bon	0.01 à < 0.02	0.02 à < 0.05	0.05 à < 0.1
moyen	0.02 à < 0.03	0.05 à < 0.075	0.1 à < 0.15
médiocre	0.03 à < 0.04	0.075 à < 0.1	0.15 à < 0.2
mauvais	0.04 et plus	0.1 et plus	0.2 et plus

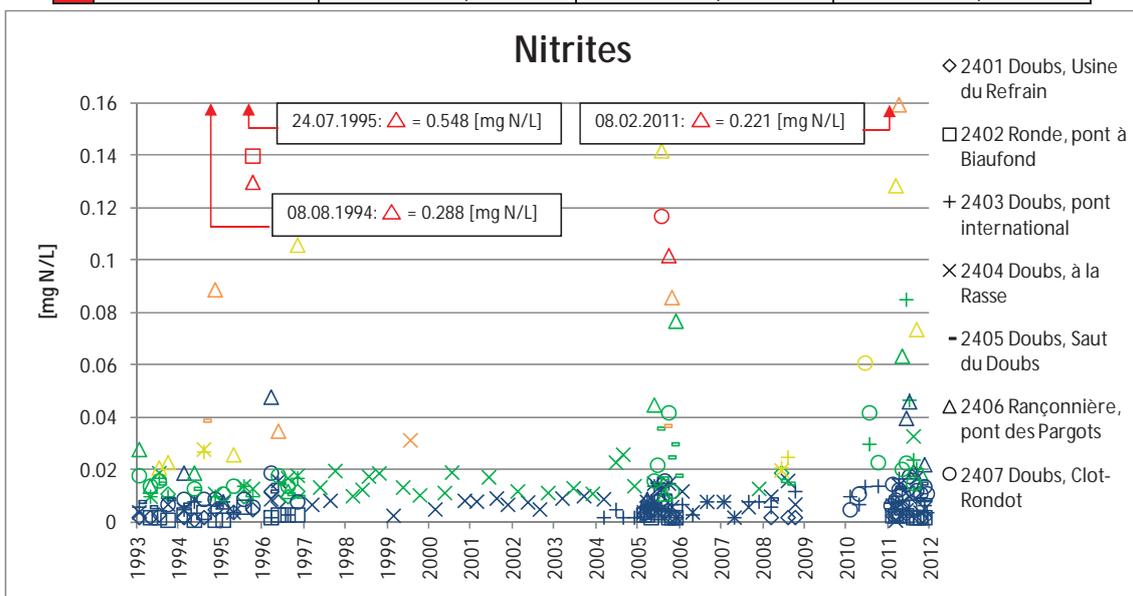


Figure 35 Concentrations instantanées en nitrites mesurées entre 1993 et 2011.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	Nitrates [mg N/L]
très bon	jusqu'à < 1.5
bon	1.5 à < 5.6
moyen	5.6 à < 8.4
médiocre	8.4 à < 11.2
mauvais	0.04 et plus

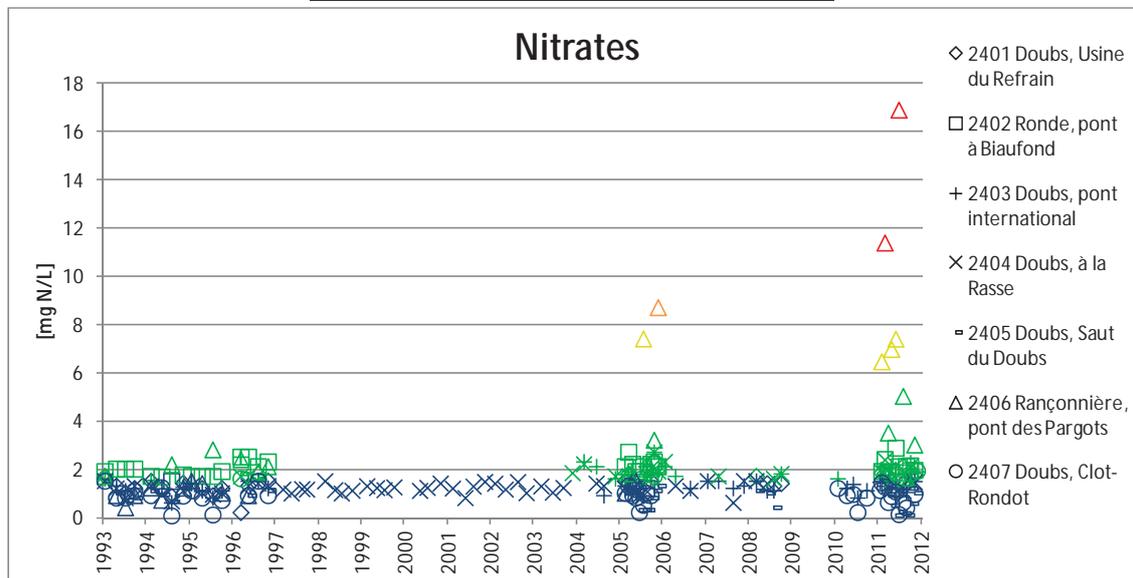


Figure 36 Concentrations instantanées en nitrates mesurées entre 1993 et 2011.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	Ortho-P [mg P/L]
très bon	jusqu'à < 0.02
bon	0.02 à < 0.04
moyen	0.04 à < 0.06
médiocre	0.06 à < 0.08
mauvais	0.08 et plus

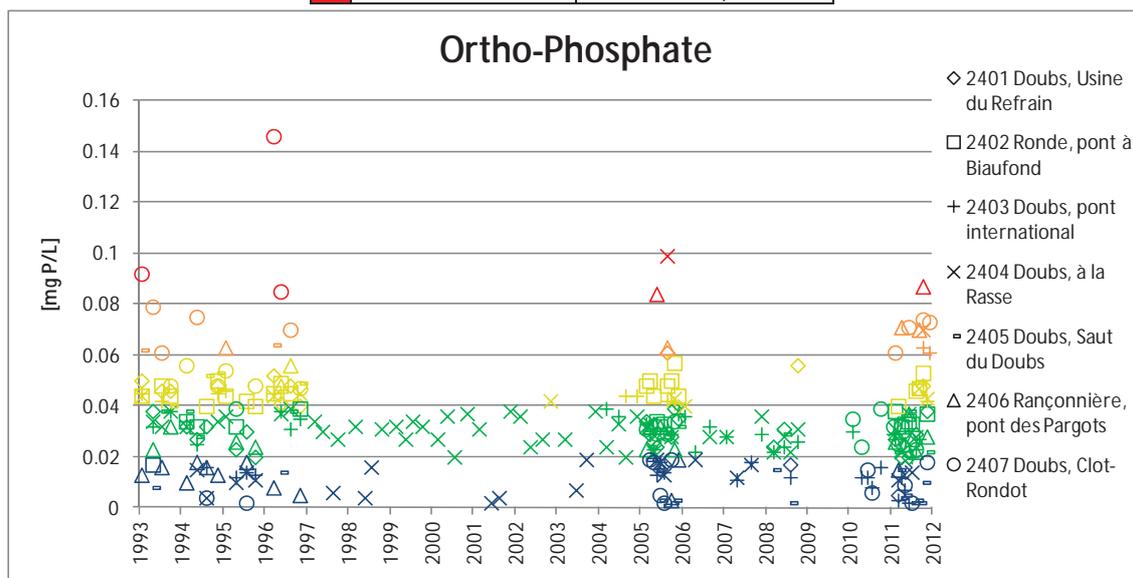


Figure 37 Concentrations instantanées en ortho-phosphates mesurées entre 1993 et 2011.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	Chlorures [mg Cl-/L]
très bon	jusqu'à < 20
bon	20 à < 40
moyen	40 à < 60
médiocre	60 à < 80
mauvais	80 et plus

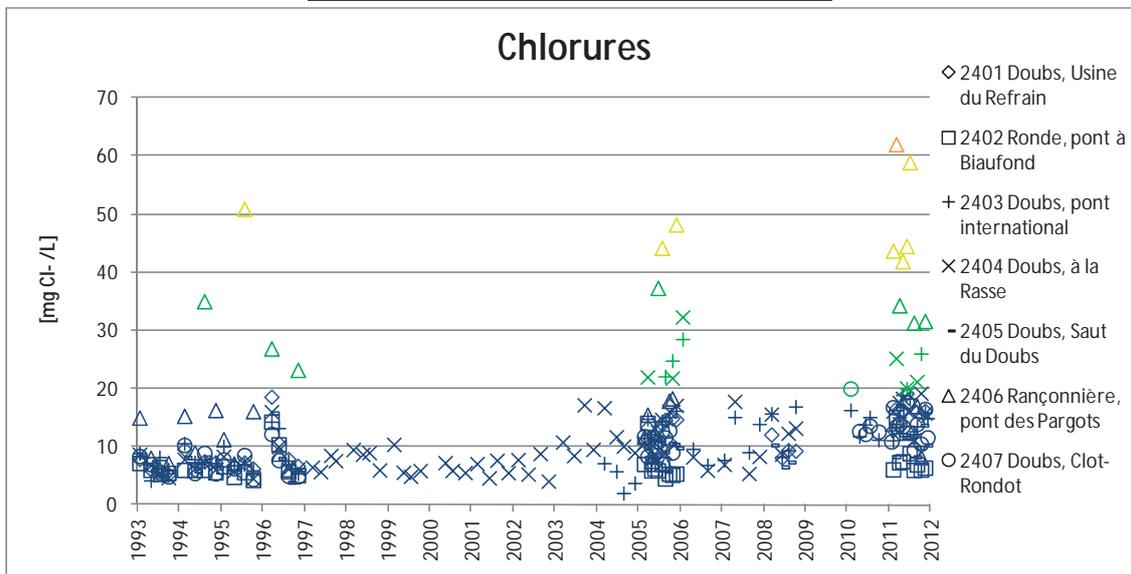


Figure 38 Concentrations instantanées en chlorures mesurées entre 1993 et 2011.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	Sulfates [mg SO4/L]
très bon	jusqu'à < 20
bon	20 à < 40
moyen	40 à < 60
médiocre	60 à < 80
mauvais	80 et plus

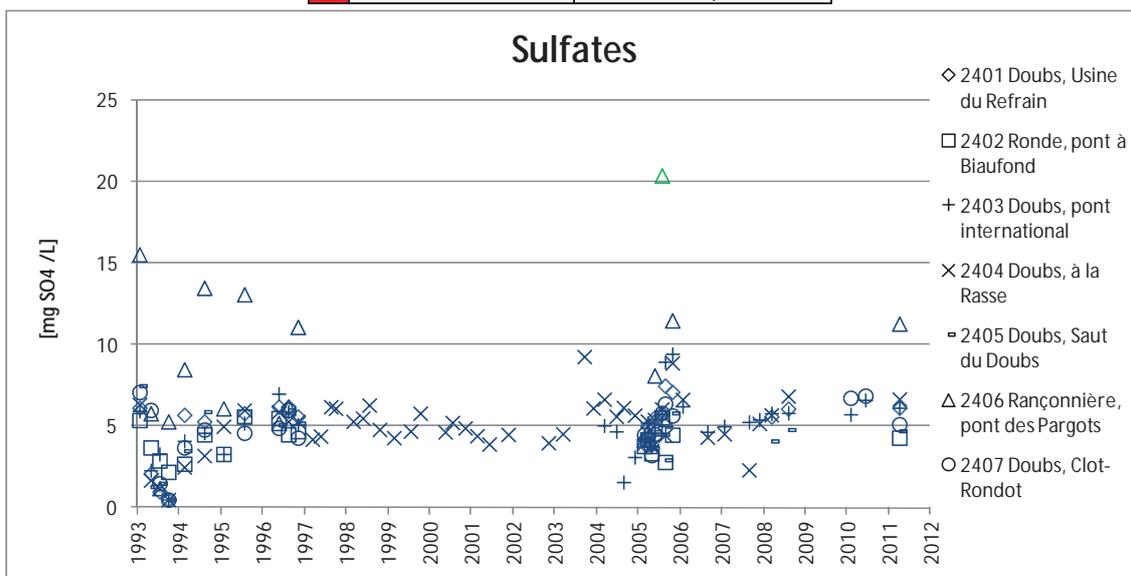


Figure 39 Concentrations instantanées en sulfates mesurées entre 1993 et 2011.

Appréciation <i>Liechti, 2010 (op. cit.)</i>	COD [mg C/L]
très bon	jusqu'à < 1
bon	1 à < 2
moyen	2 à < 3
médiocre	3 à < 4
mauvais	4 et plus

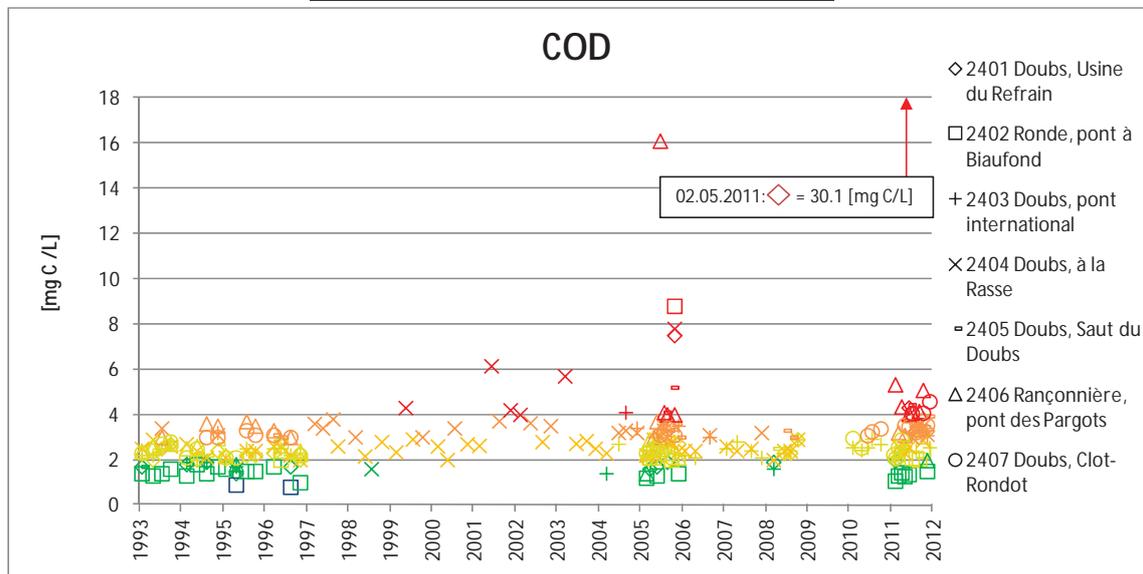


Figure 40 Concentrations instantanées en carbone organique dissous mesurées entre 1993 et 2011.

Le carbone organique dissous (COD) constitue un indicateur de pollution anthropique du cours d'eau examiné. Il y a souvent corrélation entre la composition de la biocénose et la fraction de COD facilement dégradable (en général d'origine anthropique) – dont il suffit de 1,0 mg/L C pour provoquer par exemple une prolifération de *Sphaerotilus* (bactérie proliférant dans les milieux pollués).

La valeur mesurée se compose d'une part imputable aux activités humaines et d'une partie inhérente à la situation naturelle. Ainsi, à l'état naturel, cette forme de carbone est présente dans un cours d'eau par décomposition de matière organique et par lessivage des sols du bassin versant. On constate de fortes concentrations de COD dans les émissaires de lacs eutrophes ou de marais. La décomposition des feuilles tombées dans l'eau en automne peut aussi accroître momentanément le taux de COD. L'ordonnance sur la protection des eaux tente d'en tenir compte en prévoyant une plage d'exigences allant de 1 à 4 mg/l C.

Dans le cas des mesures réalisées sur le Doubs neuchâtelois, les valeurs élevées de COD sont à prendre avec précaution, car si elles sont partiellement d'origine anthropique, elles se situent dans des portions du Doubs également fortement influencées par des zones marécageuses avec de fortes proportions naturelles de matière organique. De plus, certaines campagnes d'analyses sont ciblées en fin de période estivales ou début d'automne, périodes où les valeurs en COD sont naturellement plus élevées.

REPUBLIQUE ET CANTON DE NEUCHÂTEL
Service de l'énergie et de l'environnement

Bassin du Doubs Neuchâtelois
Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface

Résultats des analyses chimiques - Nutriments 2011
Évaluation selon Liechti P., 2010 - 90e centile

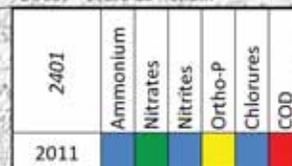
Echelle situation: -1:50'000 Unités: [-]
Echelle profil: - Altitudes: [-]

Auteur: AQUARIUS. BP 1767 CH-2001 Neuchâtel

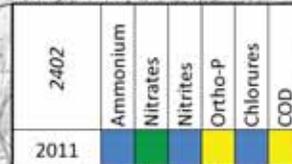
Créé / modifié le:	Dessin:	Contrôle:
06.02.2012	JPL	BZA

Données cartographiques du SITN © 2010 / Service de la
Géomatique et du Registre Foncier
CP100 - Swisstopo © 2010

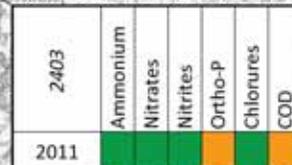
Doubs - Usine du Refrain



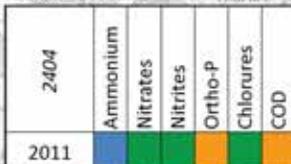
Ronde - Pont à Biaufond



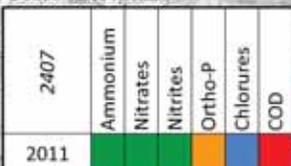
Doubs - Pont international



Doubs - La Rasse



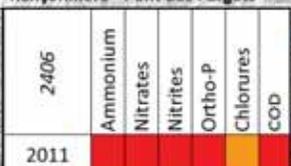
Doubs - Clos Rondot



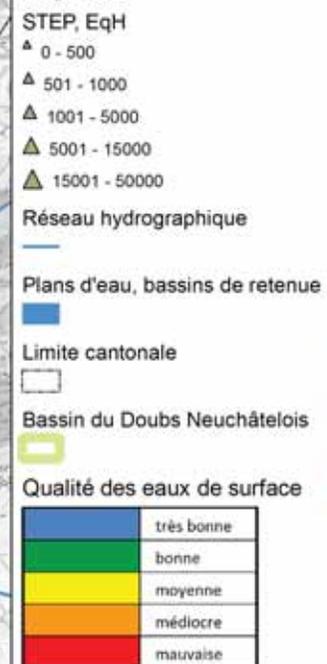
Doubs - Saut du Doubs



Rançonnière - Pont des Pargots



Légende



Les graphiques ci-après donnent une autre représentation des résultats ponctuels de nutriments sur les stations neuchâtelaises de mesures de la qualité physico-chimique des eaux pour trois périodes distinctes où les données sont les plus nombreuses.

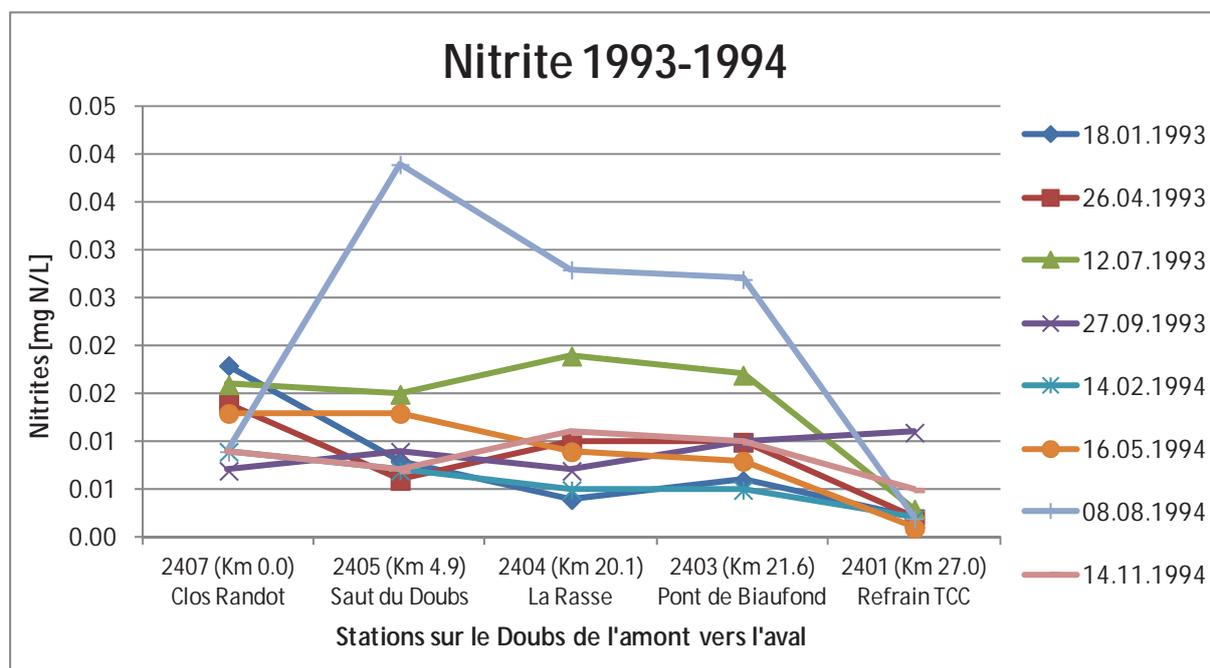


Figure 41 Concentrations instantanées en nitrites mesurées sur 5 stations du Doubs entre 1993 et 1994, de l'amont vers l'aval.

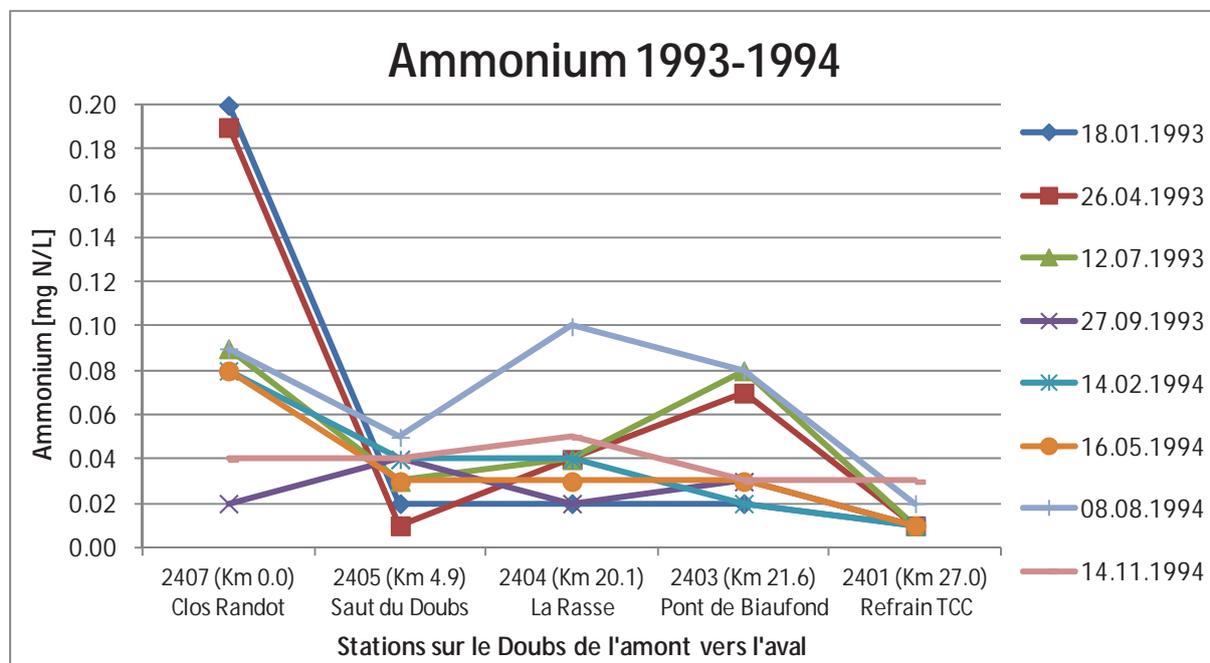


Figure 42 Concentrations instantanées en ammonium mesurées sur 5 stations du Doubs entre 1993 et 1994, de l'amont vers l'aval.

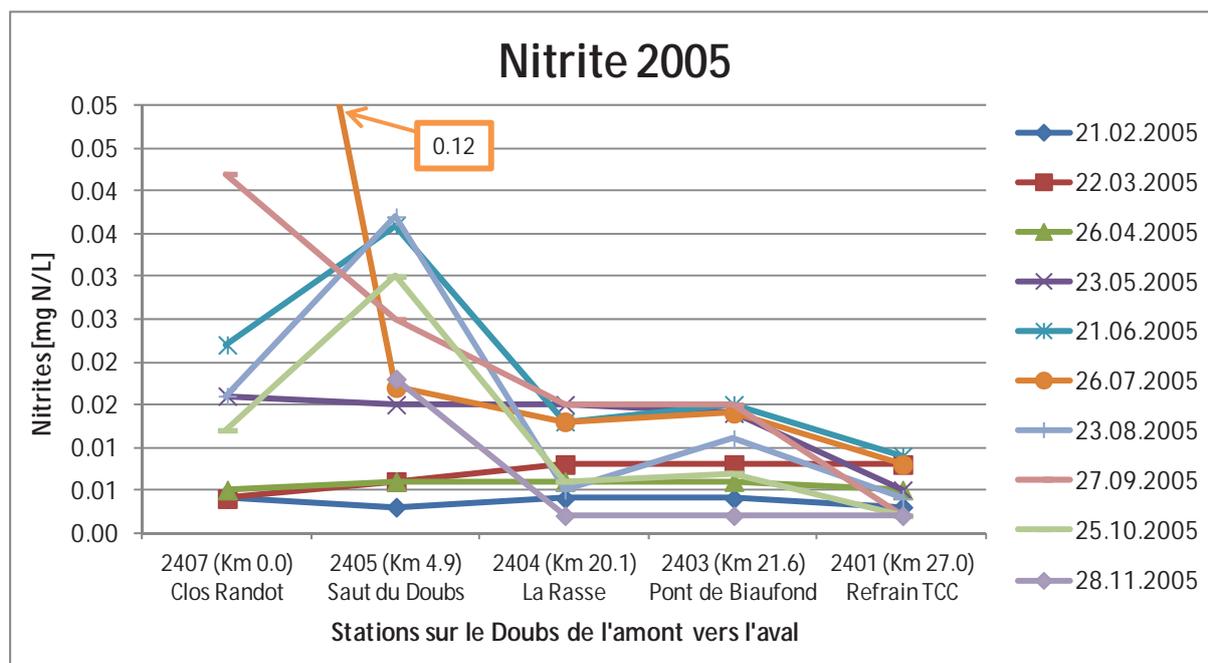


Figure 43 Concentrations instantanées en nitrites mesurées sur 5 stations du Doubs en 2005, de l'amont vers l'aval.

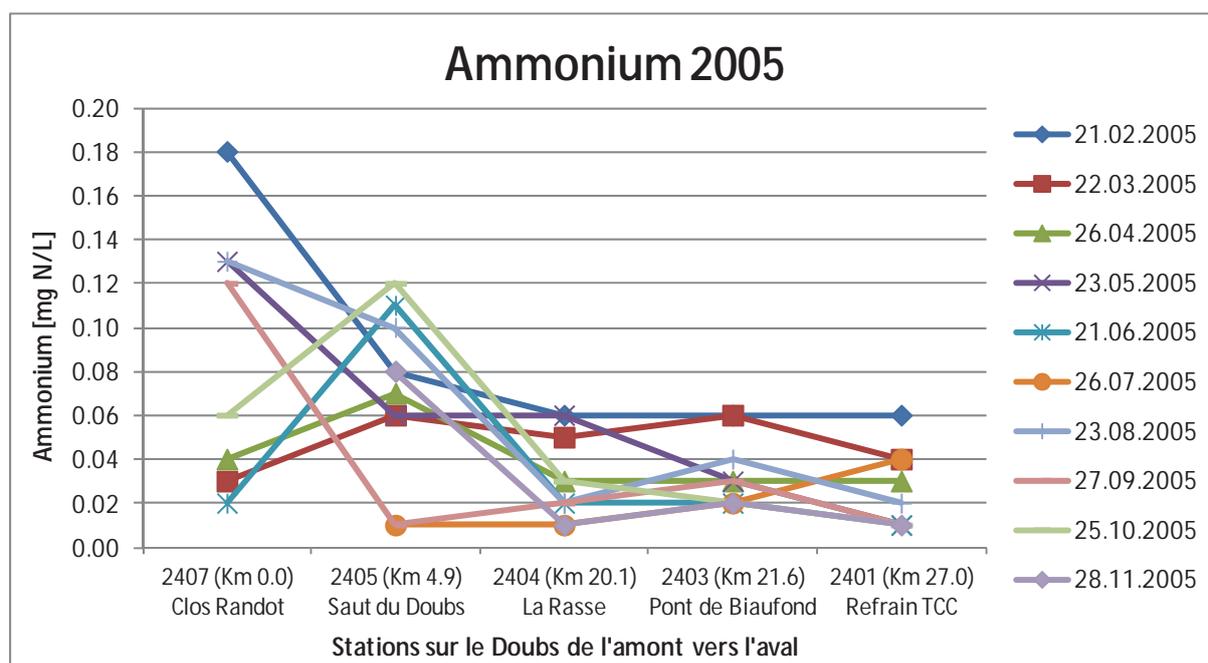


Figure 44 Concentrations instantanées en ammonium mesurées sur 5 stations du Doubs en 2005, de l'amont vers l'aval.

On remarque lors du parcours neuchâtelois du Doubs une tendance générale à la diminution (autoépuration ou dilution) des charges en nutriments provenant du Doubs français. Les apports de la Rançonnière et de la Ronde sont certainement la source de certaines valeurs ponctuellement élevées. Cela se remarque en 2011 surtout sur les valeurs de nitrites et d'ammonium qui sont trop élevée à l'Hôtel du Saut et des tendances à l'augmentation au Pont International après les sources nauséabondes et l'effluent de l'étang de Biaufond.

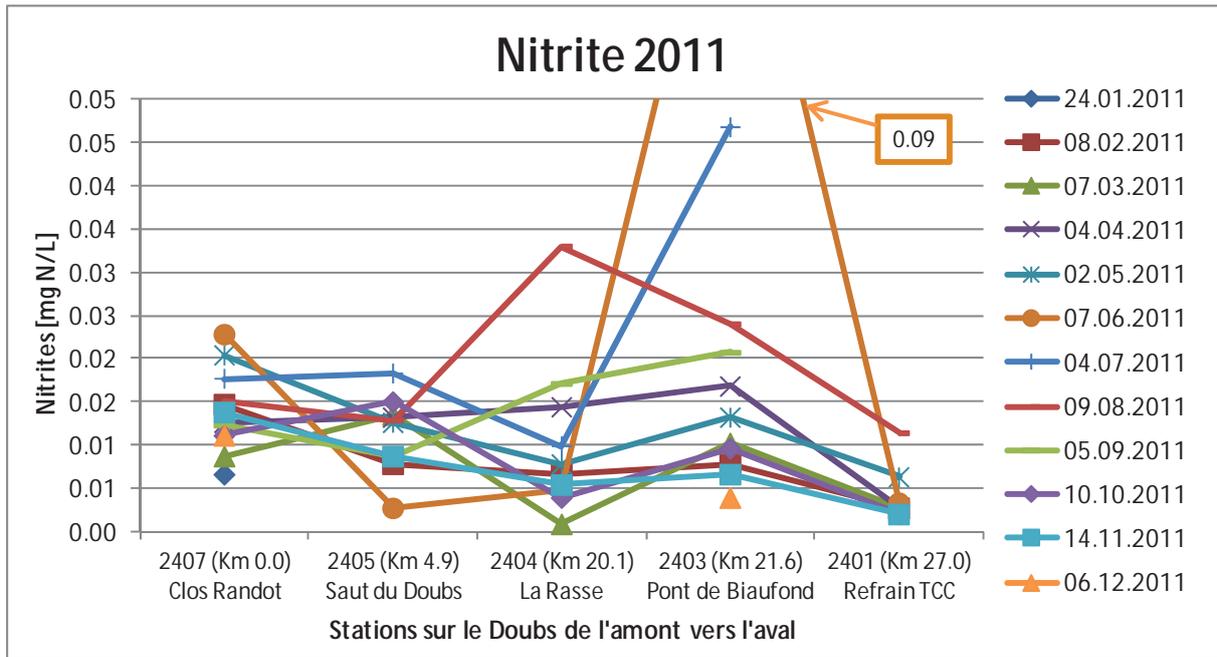


Figure 45 Concentrations instantanées en nitrites mesurées sur 5 stations du Doubs 2011, de l'amont vers l'aval.

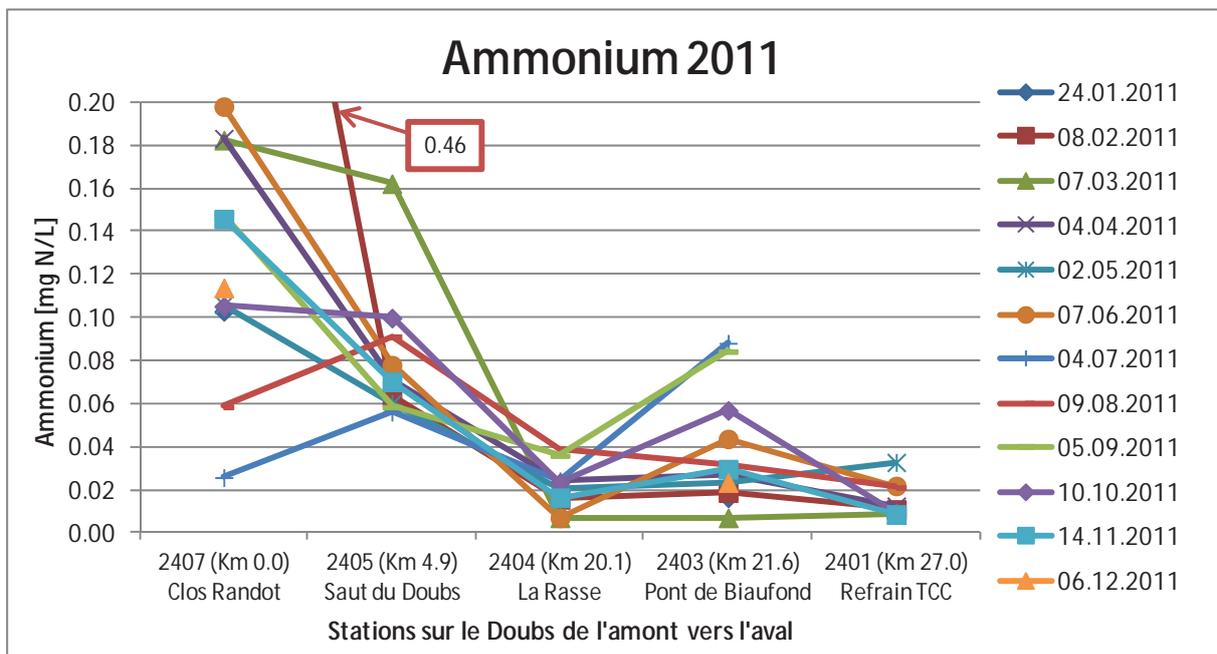


Figure 46 Concentrations instantanées en ammonium mesurées sur 5 stations du Doubs en 2011, de l'amont vers l'aval.

On constate globalement pour l'ammonium, qu'entre 1993-94 et 2005 puis 2011, le taux d'ammonium a eu tendance à croître au Clos-Rondot et à l'Hôtel du Saut.

Concernant les nitrites on remarque plutôt une certaine stabilité à moins de 0.02 mg/l en moyenne avec des pics ponctuels.

7.4.2 Micropolluants

La présence de pesticides est régulièrement mise en évidence sur le Doubs et ses affluents. On remarque en rouge sur le tableau suivant synthétisant les valeurs maximales rencontrées, qu'hormis lors de quatre mesures, dont 2 à « La Rasse », le seuil de 100 ng/l de pesticides préconisé par l'OEaux est globalement respecté sur le tronçon du Doubs évalué. Les mesures ne sont toutefois pas réalisées systématiquement lors de périodes de hautes eaux durant lesquelles les flux de pesticides sont en principe les plus importants.

	Pesticide possédant la concentration la plus importante lors de la campagne de mesure	2407 Clos Randot			2406 Rançonnière			2405 Saut du Doubs			2404 La Rasse			2403 Pont de Biaufond			2402 La Ronde			2401 Refrain TCC			
		nb. Pest. mesurés	nb. subs. détectées	valeur max [ng/l]	nb. Pest. mesurés	nb. Subs. détectées	valeur max [ng/l]	nb. Pest. mesurés	nb. Subs. détectées	valeur max [ng/l]	nb. Pest. mesurés	nb. Subs. détectées	valeur max [ng/l]	nb. mesures	nb. Subs. détectées	valeur max [ng/l]	nb. Pest. mesurés	nb. Subs. détectées	valeur max [ng/l]	nb. Pest. mesurés	nb. Subs. détectées	valeur max [ng/l]	
03.03.1998	Carbendazime									3	1	69											
26.05.1998	Simazine									3	2	11											
21.07.1998	Atrazine									3	2	26											
16.05.2000*	Pendiméthaline									10	10	20											
18.07.2000*	Pendiméthaline									10	10	20											
07.11.2000*	Pendiméthaline									10	10	20											
13.08.2001	Atrazine									20	1	68											
13.02.2002	Atrazine									20	1	3											
11.03.2003	Carbendazime									20	1	13											
17.06.2003	Diuron									20	2	<u>106</u>											
08.03.2004	Atrazin1												24	1	28								
23.05.2005	Diuron	18	1	15																			
26.07.2005	Atrazin							18	1	17													
23.08.2005	Diuron	21	1	21																			
27.09.2005	Diuron	18	1	57																			
10.06.2008	Diuron																		36	2	44		
	Terbutylazine-desethyl												37	2	35								
	Terbutylazine									35	1	41											
	Tetrachlorvinphos							35	1	37													
05.08.2008	Terbutylazine-desethyl																				36	1	42
	Tetrachlorvinphos							35	1	26													
08.02.2011	Métolachlore																				75	1	11
	Triclosan	75	1	26	75	1	<u>117</u>	75	1	42													
24.01.2011	Métolachlore												36	1	13								
07.03.2011	Atrazine																	74	1	3			
	Diethyltoluamide				75	2	<u>240</u>																
	Triclosan	75	1	23				75	1	18	73	1	18										
04.04.2011	Diuron				75	1	10																
02.05.2011	Diethyltoluamide											72	1	<u>106</u>									
04.07.2011	Terbutylazine-desethyl											73	1	5									
09.08.2011	Triclosan							73	1	12													
10.10.2011	Triclosan	73	1	14	73	1	34					73	2	16	72	1	14						
	Diuron							73	1	6													
14.11.2011	Triclosan				73	1	19																
Occurrence		6			5			7			12-15			4			1			3			

*Mesures à interpréter avec précaution, probablement situées en dessous du seuil de détection

Tableau 14 Synthèse des pesticides identifiés dans le Doubs lors des analyses effectuées entre 2000 et 2011. Seules les valeurs maximales mesurées sont présentées. Attention, l'absence de résultat peut découler de l'absence d'analyse. Les valeurs dépassant le seuil de l'OEaux sont soulignées en rouge.

7.4.3 Qualité chimique des sédiments

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats du programme de surveillance français des plans d'eau. Il montre que les sédiments du Doubs sont localement significativement contaminés par des polluants métalliques, PCB et HAP.

Le DEHP (Phtalate de di-2-éthylhexyle) est un agent plastifiant trouvé en concentration significative de 0.7 et 1.7 mg/l respectivement à Chaillexon et au Châtelot.

	Morteau 14.09.2010			Chaillexon 14.09.2010			Moron 07.10.2010			Biaufond (moy)* 2009			Biaufond (max)* 2009			Seuils								
	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	TEC [mg/Kg ms]	PEC [mg/Kg ms]	OSol [mg/Kg ms]	CIPR [mg/Kg ms]				
Arsenic	8.4				10.7				10.7				4.53				5.1				9.8	33		
Cadmium	0.9				1.1				0.8				1.12				2.2				0.99	5	0.8	1
Chrome	73.8				82.4				82.4				38.11				69				43	110	50	
Cuivre	49.9				63.9				43.3				52.72				110				32	150	40	50
fer	17'077				25'683				23512				6'481				12'000				20'000	40'000		
Manganèse	215.7				233.3				287.1				144.9				210				460	1100		
Mercuré	0.083				0.08				0.05				0.34				0.65				0.18	1.1	0.5	0.5
Molybdène	1.2				1.6				1.3													5		
Nickel	49.2				47.3				43.7				19.13				35				23	49	50	50
Plomb	77.7				44.2				34				39.3				65				36	130	50	100
Vanadium	62.7				87.4				81.3								28							
Zinc	141				170.5				137				95.45				190				120	460	150	200
PCB ²⁵	<0.03				0.18				0.013				0.078				0.16				0.06	0.676	0.1	0.028
HAP ²⁶	28.45				5.2				2.6				12.65				22				2.21	29.8	1	
Benzo(a)pyrène	1.978				0.45				0.294				1.374				2.4					0.2	0.4	

* Pour la retenue du Refrain: valeurs moyennes et maximales sur 11 échantillons.

Tous les seuils de l'OSol sont des valeurs indicatives sauf pour les PCB où le seuil d'investigation 'risque par ingestion' a été pris comme référence

Proposition d'évaluation de la contamination des sédiments selon différents critères de référence

	TEC/PEC	OSol	CIPR
insignifiante	(valeur < ½ TEC)	(valeur < ½ seuil)	(valeur ≤ seuil)
faible	(½ TEC < valeur < TEC)	(½ seuil ≤ valeur < seuil)	(seuil ≤ valeur < 2 · seuil)
moyenne	(TEC < valeur < PEC)	(seuil ≤ valeur < 2 · seuil)	(2 · seuil ≤ valeur < 4 · seuil)
élevée	(valeur > PEC)	(valeur ≥ 2 · seuil)	(valeur ≥ 4 · seuil)

Tableau 15 Synthèse des analyses des sédiments réalisées par la France.

²⁵ PCB : polychlorobiphényles. Ce sont des substances chlorées très stables (résistantes au feu et non biodégradables). Ils étaient utilisés dans les transformateurs électriques comme isolants (les anciennes installations encore en fonctionnement en contiennent donc toujours). Ils entraient également dans la composition de vernis, encres, peintures solvants, etc. Leur combustion peut générer des dioxines et furanes, substances cancérigènes et mutagènes. Ils ont une très faible solubilité dans l'eau, et une forte affinité pour les matières en suspension et les lipides. Ils s'accumulent donc dans le milieu naturel et se bioaccumulent fortement dans la chaîne alimentaire (par exemple dans la graisse des poissons).

²⁶ HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. Ce sont des composés issus de la combustion incomplète des produits pétroliers : activités urbaines (chauffage), industrielles et de transports (pots d'échappement des véhicules). Leur origine est donc généralement diffuse. Ce sont des composés peu solubles dans l'eau, ils s'adsorbent sur les matières en suspension et les sédiments et de ce fait se concentrent beaucoup dans le milieu naturel. Ils se bioaccumulent dans les graisses, notamment des poissons et des mollusques. Nombre d'entre eux (notamment le benzo(a)pyrène) sont reconnus cancérigènes.

Les résultats présentés dans les tableaux ci-après sont issus de campagnes de prélèvements de septembre 2011 effectuées dans le cadre de la présente étude pluridisciplinaire.

	Brenets, embouchure 4m				Brenets, Rançonnière 3m				Hôtel du Saut 20m				Moron, amont 25m				Moron, aval 25m				Seuils			
	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	TEC [mg/Kg ms]	PEC [mg/Kg ms]	OSol [mg/Kg ms]	CIPR [mg/Kg ms]
Cadmium	2.19				1.24				2.58				2.63				2.2				0.99	5	0.8	1
Chrome	33.5				39.5				53				44.6				37.2				43	110	50	
Cuivre	137				41.4				63.5				49.7				35.6				32	150	40	50
Mercure	0.16				0.531				0.203				0.225				0.159				0.18	1.1	0.5	0.5
Nickel	34.9				45.9				44.2				45				32.8				23	49	50	50
Plomb	76.5				19.8				34.9				39.4				30.2				36	130	50	100
Zink	233				103				158				185				142				120	460	150	200
HAP	18.53				13.34				7.07				5				5.07				2.21	29.8	1	
Benzo(a)pyrène	1.43				1.07				0.64				0.44				0.5						0.2	0.4

Tableau 16 Synthèse des analyses des sédiments réalisées par le SENE en 2011, partie 1.

	Le Châtelard				La Rasse, amont				Biaufond, amont				Biaufond, milieu lac				Seuils						
	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	Valeur [mg/Kg ms]	TEC/PEC	OSol	CIPR	TEC [mg/Kg ms]	PEC [mg/Kg ms]	OSol [mg/Kg ms]	CIPR [mg/Kg ms]			
Cadmium	0.3				1.35				1.59				1.25				0.99	5	0.8	1			
Chrome	9.8				17.7				26				20.8				43	110	50				
Cuivre	13.8				5.6				43.5				36.8				32	150	40	50			
Mercure	0.127				0.075				0.456				0.532				0.18	1.1	0.5	0.5			
Nickel	8.96				17.6				23.6				20				23	49	50	50			
Plomb	20.1				10.8				44.7				36.6				36	130	50	100			
Zink	45				46.3				115				104				120	460	150	200			
HAP	5.77				0.09				12				16.4				2.21	29.8	1				
Benzo(a)pyrène	0.6				0.00				1.2				1.65								0.2	0.4	

Tableau 17 Synthèse des analyses des sédiments réalisées par le SENE en 2011, partie 2.

Proposition d'évaluation de la contamination des sédiments selon différents critères de référence

	TEC/PEC	OSol	CIPR
insignifiante	(valeur < ½ TEC)	(valeur < ½ seuil)	(valeur ≤ seuil)
faible	(½ TEC < valeur < TEC)	(½ seuil ≤ valeur < seuil)	(seuil ≤ valeur < 2 · seuil)
moyenne	(TEC < valeur < PEC)	(seuil ≤ valeur < 2 · seuil)	(2 · seuil ≤ valeur < 4 · seuil)
élevée	(valeur > PEC)	(valeur ≥ 2 · seuil)	(valeur ≥ 4 · seuil)

Tableau 18 Proposition d'évaluation de la contamination des sédiments selon différents critères de référence.

7.4.4 Bioaccumulation dans la chair des poissons

Certaines substances peu ou pas biodégradables présentes dans l'eau ou/et les sédiments, tels que les métaux lourds par exemple ont potentiellement la propriété de se bioaccumuler. Cela signifie que ces substances sont assimilées par des organismes, sans être significativement dégradées. Elles s'accumulent ensuite par exemple dans certains tissus, avec une amplification de la concentration parfois très supérieure à la teneur présente dans le biotope. A partir d'un certain seuil, la ou les substances présentent des risques écotoxicologiques pour l'espèce touchée, voire sanitaires pour la consommation humaine.

D'un point de vue ichtyologique, les poissons prédateurs de grande taille (âgés) représentent de bon indicateurs des phénomènes de bioaccumulation. En Suisse, l'anguille (*Anguilla anguilla*), le brochet (*Esox lucius*) ou encore le silure (*Silurus glanis*) sont des espèces bien adaptées pour ce type d'étude.

Des analyses de la chair de poissons ont été effectués courant 2011 par le canton de Neuchâtel. Des poissons ont été prélevés dans le lac des Brenets, la retenue de Biaufond et également à l'aval du barrage du Refrain. Les analyses ont été confiées au Service de la consommation et des affaires vétérinaires du canton de Vaud (cf. annexe 4). Les substances qui ont été recherchées sont les suivantes :

- > Métaux : Cadmium ; chrome ; mercure ; nickel ; plomb.
- > Polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes.
- > Polychlorobiphényles de type dioxine.

Les poissons analysés à l'aval du Refrain étaient des truites. Les poissons analysés dans le lac des Brenets et la retenue de Biaufond étaient de petits gardons. L'échantillon de gardons sur le lac des Brenets était insuffisant (pas assez de chair) pour évaluer les concentrations en métaux lourds. Les résultats pour les paramètres évalués montrent des concentrations insignifiantes à très faibles dans la chair des poissons. ils sont conformes aux prescriptions concernant les denrées alimentaires (Ordonnance sur les substances étrangères et les composants²⁷, OSEC du 26 juin 1995, état le 1er juin 2011). Précisons cependant que l'analyse de la chair de jeunes gardons est un choix inadapté pour les investigations écotoxicologiques visées dans la présente étude dans la mesure où les poissons récoltés :

- > Sont de taille trop petite (individus trop jeunes et matériel d'analyse insuffisant) ;
- > ne sont pas situés à un niveau représentatif dans la chaîne alimentaire (pas une espèce prédatrice) ;
- > ne présentent pas d'intérêt pour la consommation humaine.

Les résultats doivent par conséquent être considérés avec beaucoup de réserve car le choix des espèces de poissons sur les secteurs où les sédiments sont le plus fortement contaminés (cf. chapitre précédent) n'est pas adapté. Des espèces prédatrices de plus grandes tailles (truites, brochets, silures p.ex.) sont requis pour l'évaluation de la bioaccumulation de polluant sur les parties lenticules du Doubs sur le lac des Brenets ou la retenue de Biaufonds.

²⁷ Principe : Les substances étrangères et les composants (substances) ne doivent être présents dans ou sur les denrées alimentaires qu'en quantités techniquement inévitables et ne présentant pas de danger pour la santé.

7.5 Discussion

Les investigations réalisées montrent que des apports en nutriments d'origine anthropique sont ponctuellement et localement significatifs. Bien qu'ils n'affectent globalement pas de manière critique le Doubs, les effets négatifs sur les biocénoses aquatiques peuvent devenir importants lors de conditions d'étiage prolongé, en particulier lorsqu'ils sont conjugués à des températures élevées, provoquant par exemple un très fort développement algal. Ce phénomène est régulièrement observé sur le Doubs depuis plusieurs dizaines d'années.

La présence de plusieurs pesticides est également attestée. Certains d'entre eux ont un impact avéré sur les invertébrés aquatiques. Bien que les concentrations identifiées restent globalement conformes à l'OEaux, l'effet conjugué de plusieurs substances reste difficile à estimer sur la biodiversité et l'abondance des biocénoses aquatiques. Par ailleurs, de nombreuses molécules n'ont pas été évaluées sur le bassin du Doubs neuchâtelois et peuvent potentiellement être problématiques, à l'image des Pyréthrinoides (composés particulièrement toxique pour les animaux à sang froid, tels les poissons) qui ont été relevés en concentrations très inquiétantes dans deux affluents du Doubs en 2007²⁸.

Les analyses des sédiments révèlent ponctuellement des matériaux fortement pollués susceptibles d'avoir sur les organismes aquatiques des impacts significatifs à plus ou moins court terme. Les lacs et bassins de retenue constituent des secteurs de dépôts préférentiels des polluants présents sous forme particulaire. Leur mobilisation dans la chaîne alimentaire a fait l'objet d'investigations écotoxicologiques mais la méthode employée n'est pas suffisamment fiable pour en tirer des conclusions solides.

La géologie karstique et la biodiversité du bassin du Doubs rendent cet écosystème particulièrement sensible vis-à-vis des flux et transferts de polluants dans les eaux superficielles. On notera que les sources de contamination sont multiples et diffuses. Elles surviennent déjà en tête de bassin à l'aval de Mouthe où de fortes contaminations sont régulièrement mises en évidence, à l'image de celles décrites par Falconnet (1998)²⁹. Elles se poursuivent jusqu'au lac de Chaillexon. Sur le bassin du Doubs neuchâtelois, les flux de polluants proviennent en bonne partie de la Ronde et de la Rançonnière, deux affluents qui collectent les rejets des stations d'épuration des eaux usées des villes de la Chaux-de-fonds et du Locle. Les résultats laissent également supposer que des apports intermédiaires d'origine agricole ou sylvicole sont également probables. On note toutefois globalement une amélioration de la qualité de l'eau après le parcours neuchâtelois.

Les activités agricoles, industrielles, de traitement du bois ainsi que les rejets domestiques sont les principales sources de contamination du Haut Doubs. La qualité physico-chimique des eaux et des sédiments du bassin du Doubs neuchâtelois est représentative en 2011 :

- > De l'occupation du territoire et de l'utilisation du sol à l'échelle du bassin considéré ;
- > des types d'activités anthropiques à l'échelle du bassin considéré ;
- > des déficits pluviométriques survenus entre 2009 et 2011.

²⁸ Groubatch T., Renahy S. 2007 : Diagnose hydroécologique des Biefs de Fuesse et de Vautenaivre, affluents du Doubs. Travaux de diplôme de Master de l'Université de Besançon encadrés par la Fédération de pêche du Doubs.

²⁹ J. L. Falconnet, A. Moustache, J. Y. Rouault, L. Valero : 1998 : Qualité des eaux superficielles – Affluents du Doubs. Données 1996-1997. DIREN de Franche-Comté.

8. HYDROBIOLOGIE

8.1 Périphyton

Notre étude a été programmée en fonction des connaissances préalables sur l'état biologique du Doubs et surtout en fonction de questions ou hypothèses formulées quant aux nuisances constatées spécialement en 2003 (nuisances caniculaires) et en 2010 (mortalité de poissons).

Première hypothèse : avant la construction des STEP, les eaux du Doubs étaient plus polluées que maintenant (voir l'annexe FS-2)

Deuxième hypothèse : dans les retenues, les eaux à l'interface eau/sédiment sont plus chargées en matières organiques et nutriments réduits que les eaux courantes de surface.

Troisième hypothèse : une des causes des nuisances observées actuellement est la mise en suspension des sédiments lors d'évènements météorologiques, qui ainsi libèrent des substances toxiques et des substances réduites. Ces substances intoxiquent la faune et tout au moins entraînent un grave déficit d'oxygène dissous dans les eaux de surface.

Quatrième hypothèse : des souches de cyanobactéries (algues bleues) toxiques sont responsables de la mortalité chez les poissons.

Ainsi, nous avons proposé d'investiguer dans les directions suivantes :

- a) Réaliser une série complète de prélèvements de périphyton sur substrat pierreux (épilithon) d'amont en aval en eaux courantes, afin d'obtenir une image de qualité correspondant à la norme suisse (DI-CH de l'OFEV) et aux méthodes plus scientifiques d'appréciation de qualité (trophie, saprobie, toxicité). Nous proposons pour cela 9 stations de prélèvements. Dans cette série, il est préconisé que l'impact de deux des résurgences polluées par les eaux d'épuration de La Chaux-de-Fonds (autrefois nommées les "sources nauséabondes", annexe FS-3) soit plus précisément suivi en amont et en aval : il s'agit des résurgences de la Verrerie et de la Rasse.
- b) Réaliser une série restreinte de prélèvements de périphyton à la surface du sédiment meuble (épipélon) de retenues, pour juger de l'état biologique des interfaces eau/sédiment, en liaison avec les études géochimiques des sédiments. Nous proposons deux stations de prélèvements.
- c) Analyser avec les méthodes modernes, 3 des échantillons prélevés en 1963 par Mlle Marguerite Wuthrich dans le cadre du projet franco-suisse qui n'a pas été réalisé (annexe FS-2). Ces échantillons sont préparés (très bien conservés) mais n'ont jamais été analysés. Ils sont disponibles dans la collection Wuthrich. Ils devraient permettre de confirmer ou infirmer les hypothèses quant à l'état du Doubs à l'époque : les pêcheurs prétendent qu'il était en meilleur état qu'actuellement, nous prétendons qu'il était en moins bon état, avant la construction des STEP et limitation des rejets industriels (métaux lourds et solvants organiques) par les industries de La Chaux-de-Fonds ou du Locle.
- d) Prélever les cyanobactéries à la surface des sédiments tout le long du tronçon, pour compléter les connaissances que nous avons à partir de prélèvements ponctuels.

8.1.1 Suivis et données existantes anciennes

Des données récentes existent sur les peuplements de diatomées, de cyanobactéries et d'autres algues, sur le bassin versant du tronçon neuchâtelois et jurassien du Doubs. Elles concernent le Doubs lui-même, La Ronde/Source de La Rasse, l'étang de Biaufond et Le Bied du Locle/La Rançonnière. Elles sont utilisées pour comparer les résultats obtenus cette année. Ces données proviennent de différentes études de suivi réalisées pour le compte du Service de l'énergie et de l'environnement (Straub 2005, 2009, 2011), de la Commune de La Chaux-de-Fonds (Straub 2003a, b, c, 2004, 2006a, b, et du Groupe-E (Straub, 2010). Les stations de prélèvements et les dates des prélèvements qui ont fournis ces données figurent dans les différents tableaux de l'annexe FS-1.

Des données existent également sur les diatomées du cours complet du Doubs, de la source jusqu'à Verdun, obtenues en septembre 2004 par la DIREN de Dijon (DIREN Bourgogne 2005). Parmi ces données, celles du Soubey (aval de Morteau) et celle de Goumois sont utilisées pour comparaison puisqu'elles délimitent notre tronçon en amont et en aval (après conversion des résultats bruts en valeurs d'indices utilisés en Suisse).

Enfin, trois échantillons historiques de diatomées datant de 1963 de la collection Wuthrich ont été analysés en plus pour donner une profondeur historique à nos conclusions (à propos de l'origine de ces échantillons voir l'annexe FS-2).

Pour les autres algues, en particulier les cyanobactéries (algues bleues) nous avons à disposition quelques données originales provenant des prélèvements isolés qui figurent dans le dernier tableau de l'annexe FS-1. Ces données complètent plusieurs études réalisées par des chercheurs français sur le cours du Doubs, mais aussi sur les lacs des Brenets et de Moron (Agence de l'eau 2011a et b).

8.1.2 Prélèvements réalisés en 2011

Pour atteindre les objectifs énoncés en tête de chapitre (8.1 Périphyton), le choix des stations pour l'étude des diatomées a suivi les principes suivants :

- > La possibilité de faire des prélèvements compatibles avec les méthodes d'appréciation de la qualité biologique des rivières (en eau courante sur substrat pierreux);
- > l'intégration de stations dans lesquelles des études ont déjà été faites récemment (2005 et 2008), pour juger de la stabilité des eaux ou leur variabilité. Les stations autour du Pont de la Rasse sont proposées de nouveau, car en 2005 l'état des eaux était mauvais à cet endroit;
- > l'intégration de stations dans lesquelles il existe des échantillons historiques de 1963 le long du tronçon neuchâtelois, pour juger des variations de qualité sur ces 45 dernières années;
- > l'intégration de nouvelles stations qui permettront de compléter le diagnostic :
 - au Clos Rondot pour avoir une référentielle des eaux qui entrent dans le tronçon suisse du Doubs
 - au pied du barrage du Châtelot, pour évaluer les effets du Saut du Doubs et du lac de Moron sur la qualité des eaux ;

- à l'amont et à l'aval de la source sous-aquatique de la Verrerie pour juger de l'impact de La Chaux-de-Fonds, comme autour de la source de la Rasse ;
- > l'intégration de nouvelles stations dans trois retenues (prélèvements en plongée à la surface des sédiments) pas trop profondes et situées directement en amont de stations dans lesquelles des analyses chimiques et de diatomées épilithiques sont prévues ou aux endroits dans lesquels des prélèvements historiques sont disponibles.

Les prélèvements réalisés en 2011 figurent dans les deux tableaux ci-dessous. Les prélèvements qui ont été étudiés sont indiqués en couleur. Les autres prélèvements restent à disposition pour tout complément d'étude.

Stations SENE	Stations PGEE La Ch.-de-Fds	No de prélèvement in coll. F. Straub	Dates	Lieux de prélèvement	Coordonnée x	Coordonnée y	Altitude [m]
2407		P-1371	09.09.2011	Les Clos Rondot (F)	542680	212600	752
2405		P-1372	09.09.2011	Aval Hôtel du Saut du Doubs	544683	215065	750
		P-1373	09.09.2011	Le Châtelot, en aval du Restaurant	547076	217321	660
	DbV	P-1374	09.09.2011	Amont source de la Verrerie	553459	221411	620
		P-1375	09.09.2011	Aval source de la Verrerie	553613	221792	620
2404	DbA	P-1376	09.09.2011	Aval Pont de La Rasse, bas des rapides	555875	222075	615
	DbB	P-1377	09.09.2011	Aval source de la Rasse	555300	222925	609
2403	DbC	P-1378	09.09.2011	Pont international de Biaufond (galets)	555980	22385	609
2401		P-1379	09.09.2011	Usine du Refrain (F)	557170	226420	585

Tableau 19 Stations de prélèvement des diatomées sur des galets, destinées au diagnostic des eaux courantes ou modérément stagnantes de surface. Les prélèvements correspondent aux méthodes de la norme suisse pour l'étude des rivières (SMG, Système modulaire intégré de la Confédération). **Prélèvements étudiés**

Les diatomées épilithiques ont été prélevées sur les galets par grattage avec un appareil de Douglas, selon le module diatomées du SMG, mais en relevant la surface grattée en cm². Cela permet d'obtenir après analyse au microscope, en plus de la composition semi-quantitative des peuplements prévue par le SMG, une estimation quantitative des communautés, c'est-à-dire le nombre de cellules par cm² (densité des peuplements). Cet aspect des peuplements a été utilisé pour tenter de mettre en évidence des pressions létales envers les diatomées comme la toxicité des eaux ou l'érosion (p. ex. Straub 2008 ou Bernard & Straub 2010).

Stations SENE	Stations PGEE La Ch.-de-Fds	No de prélèvement in coll. F. Straub	Dates	Lieux de prélèvement	Coordonnée x	Coordonnée y	Altitude [m]
		S-1386	14.09.2011	Embouchure du Doubs dans le lac des Brenets	542841	212964	750
		S-1387	14.09.2011	Aval de l'embouchure de la Rançonnière	543451	212881	750
		S-1388	14.09.2011	En amont du seuil de l'Hôtel du Saut	544470	214939	750
		S-1384	14.09.2011	Amont lac de Moron	545720	215732	716
		S-1385	14.09.2011	Aval lac de Moron	547515	216607	716
		S-1382	07.09.2011	Le Châtelard	553734	221911	618
		S-1383	07.09.2011	En amont du seuil du pont de la Rasse	554784	222788	618
2403		S-1380	07.09.2011	Sous le pont international	555980	223850	609
		S-1381	07.09.2011	Haut fond en amont du lac de Biaufond	555820	223922	609

Tableau 20 Stations de prélèvement des diatomées et des cyanobactéries (algues bleues) à la surface des sédiments des retenues destinées au diagnostic de la qualité des interfaces eau/sédiment. Ces prélèvements ne correspondent à aucune méthode normalisée. **Prélèvements étudiés.**

Pour l'analyse des diatomées, le biofilm situé à la surface des sédiments a été prélevé en plongée, avec une seringue munie d'un embout flexible lorsque la profondeur était relativement faible (prélèvements S-1380 à S-1383). Lors de ces prélèvements, les tapis d'algues filamenteuses étaient prélevés séparément par écumage avec un flacon à large col. Les autres échantillons ont été prélevés en surface des pâtés de sédiments prélevés au moyen d'une benne "Eckman" à partir du bateau. Il n'y a pas actuellement de méthode standardisée pour l'étude des diatomées de la surface des sédiments meubles (épipélon). Les méthodes de prélèvement que nous avons pratiquées ne permettent pas d'estimer la densité des peuplements (il faudrait pour cela prélever des carottes de sédiments sous congélation). Par contre, ce type de prélèvement permet par analyse microscopique, d'établir la composition semi-quantitative des peuplements, d'une manière proche de ce qui est prévu par le SMG pour les eaux de surface en rivières. Il faut signaler, que ce genre de communauté a été utilisé avec succès pour faire le suivi de la qualité des interfaces eau/sédiment sur le littoral de la commune de Neuchâtel, pour l'étude d'impact de la STEP (Straub 2002).

8.1.3 Méthodes utilisées pour le diagnostic

Les méthodes utilisées pour le diagnostic de la qualité des eaux courantes figurent dans l'annexe FS-5 (la bibliographie liée à ces méthodes est citée à la fin de ce document). Il s'agit soit de méthodes d'application standardisées (indice DI-CH, indice trophique), soit de méthodes développées dans un but scientifique et qui complètent les interprétations routinières. Ces méthodes permettent d'estimer le niveau classique de pollution (DI-CH), le taux d'engrais minéraux (indice trophique), la charge en matières oxydables (niveau saprobique), donner une indication sur l'état des peuplements, en particulier révéler des facteurs environnementaux létaux (densité de peuplements, taux de fragmentation, taux de formes tératologiques). La base taxonomique reste la flore d'Europe de Krammer & Lange-Bertalot 1986-1991, mais complétée par les révisions les plus récentes, en particulier la flore de Hofmann *et al.* 2011. Ces méthodes ont aussi été appliquées aux échantillons historiques.

Pour l'étude des diatomées épipéliques (en surface des sédiments), il n'y a pas de méthode standardisée. Pour cette étude, nous avons préparé et analysé les communautés épipéliques de la même manière semi-quantitative que pour les communautés épilithiques. Pour l'interprétation, nous avons calculé les mêmes indices, bien qu'ils ne soient en principe pas totalement adaptés à ce genre de communautés, simplement pour pouvoir comparer de manière pratique l'état des eaux courantes à l'état des eaux à l'interface des sédiments. Pour ces calculs, nous avons tenu compte uniquement des abondances des espèces benthiques. Les abondances des espèces planctoniques ont été retirées des calculs, car ces espèces ne donnent pas une image du lieu de prélèvement. En effet, ces espèces vivant en suspension dans l'eau proviennent de l'amont par dérive et ne donnent qu'une indication sur l'état des eaux de surface. Par contre, une petite discussion sur ces espèces planctoniques est donnée au chapitre 8.1.4.

8.1.4 Résultats bruts

Les résultats bruts des analyses de diatomées, donnés en fréquences relatives des espèces, figurent sur le tableau de l'annexe FS-6, en regard de la liste floristique trouvée dans les 14 échantillons présentés ici. Sur ce tableau, les taxons sont ordonnés par classes de résistance saprobique selon Horst Lange-Bertalot (colonne B, saprobie). Les valeurs écologiques des taxons, nécessaires pour le calcul de l'indice DI-CH2002 (D = valence, G = amplitude) sont données dans les colonnes C et D. Les nouvelles valeurs pour le calcul de l'indice DICH2006 sont données dans les colonnes E et F. Les valeurs écologiques des taxons nécessaires pour le calcul de l'indice trophique selon Schmedtje *et al.* 1998 (T2 = valence, G2 = amplitude) sont données dans les colonnes G et H. Les formes tératologiques éventuelles sont signalées dans la colonne I. Enfin, dans les colonnes J à T, les degrés de raréfaction des taxons sont donnés en fonction de la liste rouge de Lange-Bertalot 1996. Ces indications fondent les interprétations d'ordre patrimonial, en particulier pour la comparaison avec des échantillons historiques. Les sommes et valeurs qui établissent le diagnostic figurent au bas de ce tableau successivement : état des peuplements, niveau saprobique, indices suisses DI-CH, trophie et indications de valeur patrimoniale des peuplements.

La plupart des espèces de diatomées trouvées sont illustrées dans le guide d'application du DI-CH (Hürlimann et Niederhauser 2006).

Les échantillons bruts et préparations microscopiques de référence sont déposés dans la collection F. Straub au Musée d'histoire naturelle de La Chaux-de-Fonds.

Les résultats des analyses de cyanobactéries trouvées en surface des sédiments sont rassemblés dans le chapitre 8.1.6 avec une indication non chiffrée de leur abondance.

8.1.5 Etat des peuplements de diatomées

Les densités mesurées des peuplements de diatomées épilithiques sont présentées sur la figure ci-après. En 2011, en eaux courantes, les densités se situent autour de 2 à 3 millions de cellules par cm^2 en amont à l'Hôtel du Saut et à Aval Châtelot, tandis qu'à l'Usine du Refrain le peuplement est de 7 millions de cellules par cm^2 . En eaux stagnantes ou quasiment stagnantes les peuplements sont plus développés : 5 millions au Clos-Rondot et de 9 à 16 millions entre l'Amont Source Verrerie et le Pont international à Biaufond. Par rapport aux mesures réalisées en 2005 et 2008, ces valeurs sont assez stables, sauf apparemment aux Rapides de la Rasse. Cette différence marquée est liée au lieu exact des prélèvements qui n'ont pas pu être réalisés de la même façon. En 2005 et 2008, les prélèvements ont pu être réalisés dans les rapides eux-mêmes, où l'eau était courante avec des vitesses respectivement de 0.43 et 1.0 m/s. Cette année, le débit était tel, qu'il aurait été dangereux, même en s'assurant, de prélever dans les rapides. De ce fait, nous avons prélevé au bas des rapides, à un endroit pas trop profond, mais où l'eau était quasi stagnante (vitesse de 0.05 m/s).

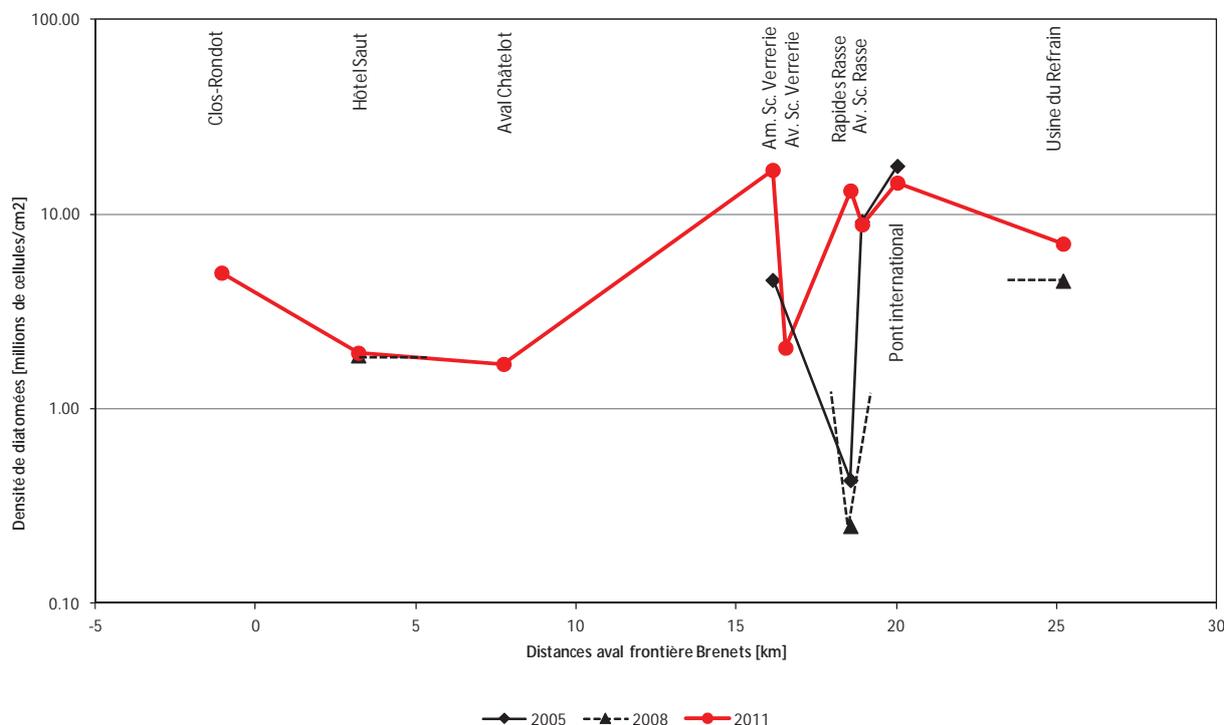


Figure 47 Densité des peuplements de diatomées épilithiques d'amont en aval du tronçon neuchâtelois du Doubs. En rouge: mesures 2011. En noir : mesures 2005 et 2008.

De ce fait, à cet endroit, on trouve la même densité de diatomées qu'aux autres endroits stagnants. Plus surprenantes sont les valeurs trouvées en 2005, puis en 2011 autour de la Source de la Verrerie (densités trop faibles pour des eaux quasiment stagnantes), et aussi au Clos-Rondot en 2011 où la vitesse de l'eau est également très faible. Pour comprendre plus précisément les causes de ces variations de densité, les mesures sont distribuées par rapport aux vitesses de l'eau sur la figure ci-après. Si l'on tient compte de toutes les valeurs, on trouve qu'une fonction exponentielle inverse explique le 76.9% ($R^2=0.59238$) des variations de densité par les variations de vitesse (encadré rouge) : l'augmentation de vitesse de l'eau limite le développement des diatomées. Si en plus on exclut les trois valeurs les plus discriminantes (points rouges), la correspondance entre densité de diatomées et vitesse de l'eau est encore meilleure : le modèle logarithmique explique dans ce cas le 87.0 % des variations ($R^2=0.7577$).

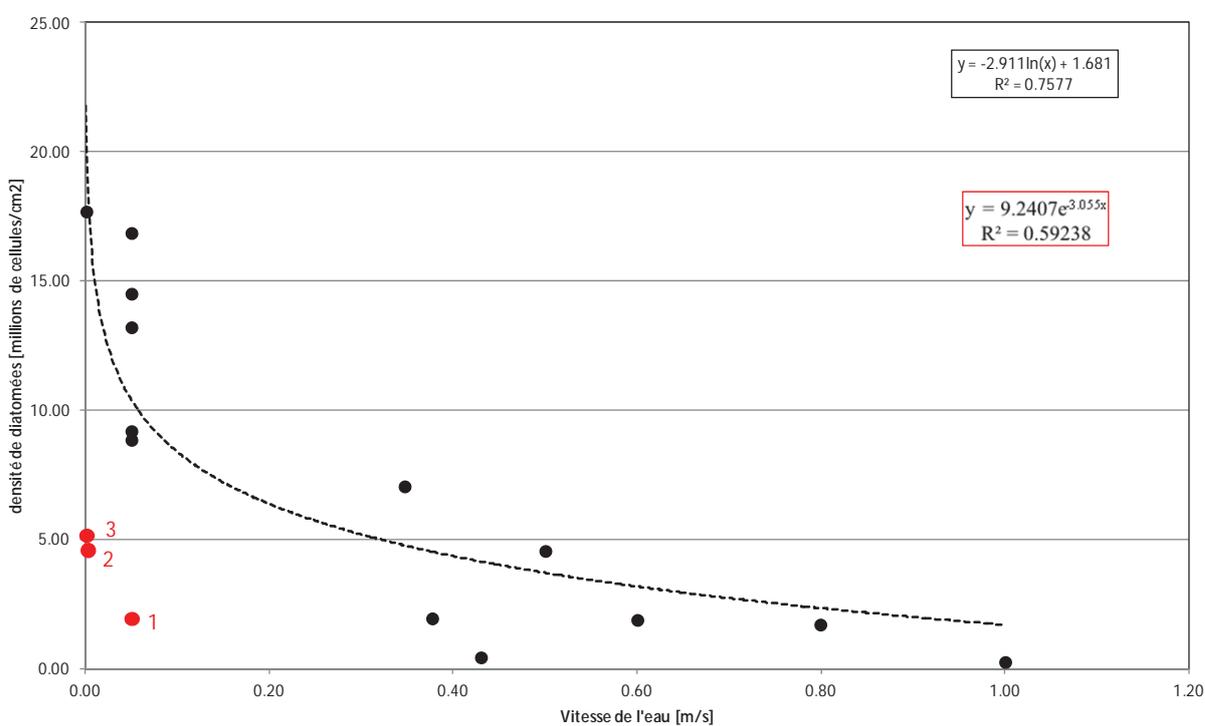


Figure 48 Distribution des densités des peuplements en fonction des vitesses des eaux mesurées à chaque endroits. En enlevant les trois valeurs les plus discriminantes (1 = Aval Source Verrerie 2011, 2 = Amont Source Verrerie 2005, 3 = Clos-Rondot 2011), la régression montre que les variations de vitesse expliquent le 87.0% des variations de densité selon une fonction logarithmique (encadré noir).

Cette relation nous indique, que les variations de densité sont en général liées à des facteurs hydrologiques locaux, et que les faibles densités ne sont pas liées à des facteurs létaux d'origine chimique. A trois endroits cependant, les faibles valeurs de densité, ne sont pas uniquement liées à la vitesse : on peut penser qu'un autre facteur létaux y limite le développement des diatomées.

La densité des peuplements en surface des sédiments (diatomées épipéliques) n'a pas pu être mesurée, mais dans tous les échantillons une pléthore de diatomées est présente. Il n'y a pas trace d'une éventuelle létalité à ce point de vue, même pas en aval de la Rançonnière.

Les taux de fragmentations mesurés en eaux courantes ne sont en général pas significatifs d'une mortalité anormale des diatomées, sauf à l'Usine du Refrain, où le taux atteint 73.8% pour une vitesse de 0.35 m/s (figure ci-après). Dans les eaux lentes ou stagnantes, les taux de fragmentation sont plus élevés, ce qui est normal, d'autant plus que les assemblages contiennent de fortes proportions d'espèces planctoniques, qui sont plus fragiles que les espèces benthiques.

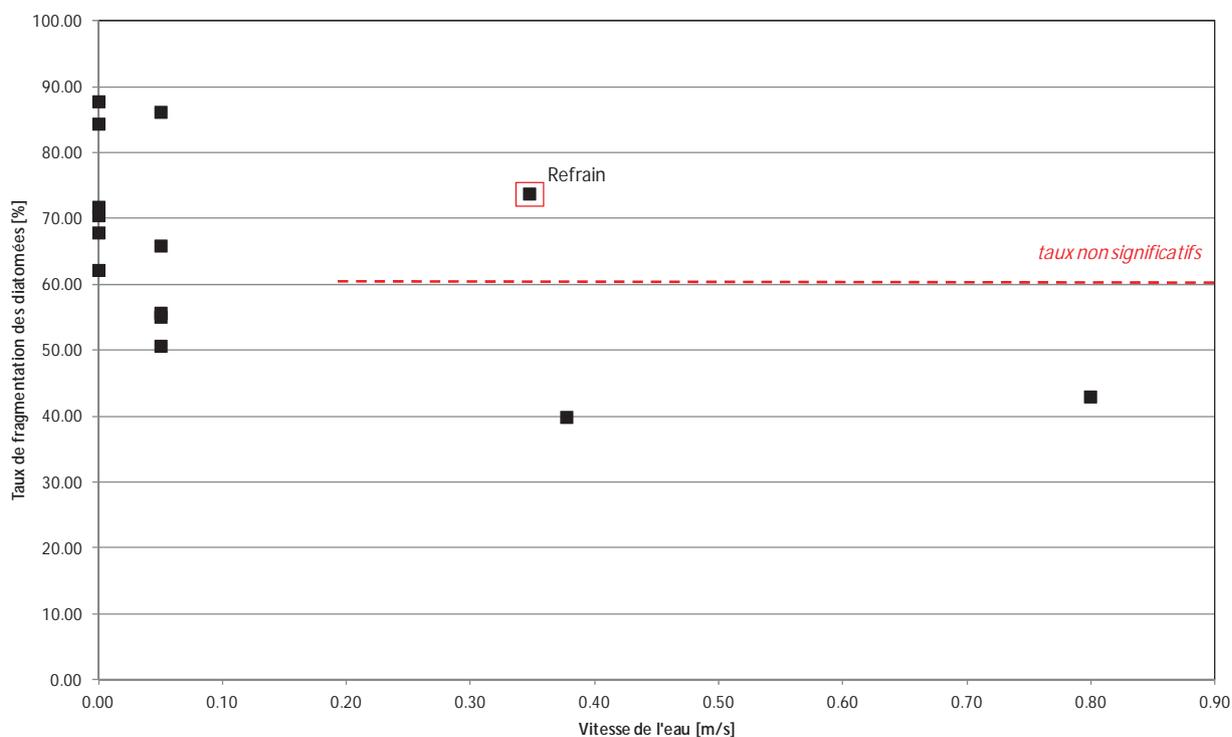


Figure 49 Distribution des taux de fragmentation des diatomées en fonction des vitesses des eaux pour les 14 échantillons analysés en 2011. Ces taux ne sont pas significatifs de mortalité anormale (< 60% pour des vitesses ≥ 0.2 m/s), sauf à l'Usine du Refrain.

Il faut noter tout de même, que dans les échantillons historiques de 1963, les taux de fragmentation sont encore moins élevés : 27.8% dans les rapides de la Rasse, 30.7% à la surface du sédiment du lac de Biaufond, pourtant en eau stagnante. Dans cette ancienne série, c'est en bordure de ce lac, dans les sables, que le taux de fragmentation est le plus élevé à 65.6%. Cela peut s'expliquer par l'agressivité de ce type de substrat (érosion) envers les diatomées.

Nous n'avons pas eu l'occasion de mesurer l'impact des perturbations hydrologiques (crues, naturelles, éclusées) sur l'état des peuplements de diatomées.

Les taux de formes tératologiques (forme anormale présentant des déformations ou variations significatives) trouvés dans les assemblages d'épilithon et d'épipélon sont distribués d'amont en aval sur la figure suivante. Les valeurs trouvées cette année sont comparées aux proportions trouvées en 2005 et 2008. Dans les échantillons de 1963, quasi aucune forme tératologique n'a été trouvée.

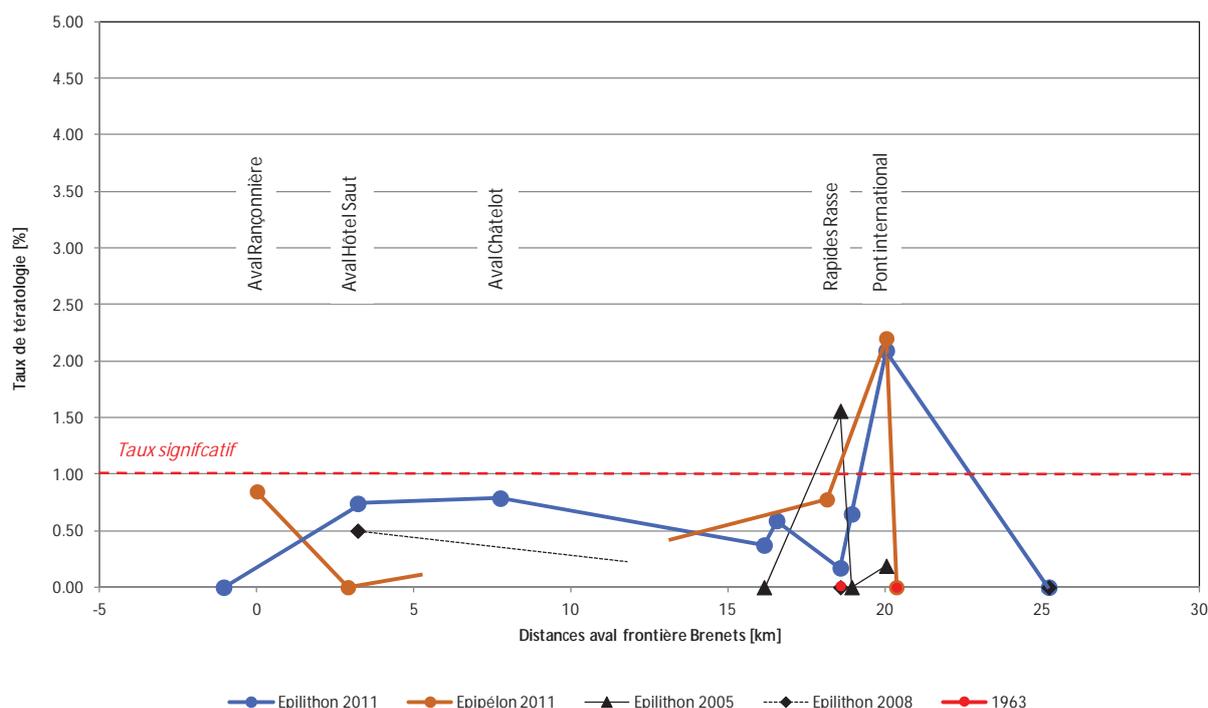


Figure 50 Distribution des taux de formes tératologiques trouvées dans les assemblages de diatomées. Dans l'état actuel des connaissances, des taux de 1% sont déjà significatifs de conditions anormales de développement des diatomées, bien que certains auteurs considèrent que des taux moindres le sont aussi.

Il ressort de cette distribution que les facteurs tératogènes sont actuellement les pires au Pont international, tant dans l'eau courante qu'à l'interface eau/sédiment. Certaines proportions sont cependant déjà présentes un peu en amont, c'est à dire à la surface du sédiment, en amont de la retenue de la Rasse et dans l'eau courante en aval de la Source de la Rasse. On peut remarquer aussi qu'entre l'amont et l'aval de la Source de la Verrerie la proportion augmente légèrement.

Tout en amont du tronçon, une proportion presque significative a été trouvée sur le sédiment à l'aval de la Rançonnière, tandis que dans l'eau courante du Doubs en amont du lac de Brenets, le taux est nul. Il est intéressant de constater que sur le sédiment du dernier bassin, en amont de l'Hôtel du Saut, le taux est nul. Par contre dans l'eau courante, en aval de l'Hôtel du Saut, et aussi en aval de barrage du Châtelot, des proportions non négligeables ont été trouvées. Ces abondances de formes tératologiques correspondent le mieux aux variations des taux de nitrites (p. 62 et p. 69), en particulier à l'aval de la Rançonnière et au Pont International. Ces variations correspondent aussi grosso modo aux variations de l'indice de toxicité SPEAR obtenu à partir des communautés de macroinvertébrés (p. 106). Par contre, il ne semble pas y avoir de corrélation directe avec les taux de pesticides, métaux lourds et micropolluants mesurés dans les eaux courantes (p. 70). La correspondance est meilleure avec les taux de ces substances dans les sédiments : fortes teneurs dans les retenues (p. 72). Cette répartition actuelle, ne correspond pas aux quelques données plus anciennes que nous avons, à part à l'aval de l'Hôtel du Saut en 2008. En 2005, c'est dans les rapides de la Rasse que la proportion était la plus élevée. Pour comparaison, nous avons trouvé en 2002 dans la Ronde à l'aval de la STEP 1.4 à 4% de formes tératologiques. Par contre dans la Rançonnière en 2005, aucune monstruosité n'avait été relevée, malgré l'état très pollué du cours d'eau!

Les proportions trouvées actuellement sont assez cohérentes par rapport aux sources de pollution : forte proportion à l'aval de la Rançonnière, augmentation à l'aval des deux sources nauséabondes de la Verrerie et de la Rasse (annexe FS-3), forts taux au Pont international dont les eaux quasi stagnantes sont aussi tributaires de l'effluent de l'Etang de Biaufond (lui même pollué par les résurgences sous aquatiques de la Ronde). Par contre, ce qui est surprenant, est la marque de facteurs tératogènes non négligeables dans l'eau courante à l'aval du lac des Brenets (comme en 2008) et l'absence de telles marques à la surface du sédiment du lac de Biaufond, dont la station de prélèvement est pourtant très proche du Pont International. Il faut relever, qu'en moyenne à l'interface sédiment/eau les marques de facteurs tératogènes ne sont pas plus élevées que dans l'eau courante. Cela veut peut-être dire que ces facteurs tératogènes sont en bonne partie déjà solubilisés dans l'eau courante (résidus de pesticides et de médicaments) et qu'ils ne proviennent pas uniquement par mise en suspension des sédiments (métaux lourds). Cette observation contredit notre 2^e hypothèse. Dans l'ensemble des résultats, plusieurs surprises incitent à la réflexion, dans l'ordre : le taux nul dans le Doubs en amont du lac des Brenets, le taux relativement faible sur le sédiment à l'aval de la Rançonnière, l'augmentation brusque à partir de la retenue de Maison-Monsieur, jusqu'au Pont international, puis soudainement la disparition totale dans le lac de Biaufond et au Refrain. Autre surprise est aussi le décalage des pics entre 2005 et 2011. En 2005 était signalée une pollution importante en amont des rapides de la Rasse (Straub 2005, la pollution provenait-elle de la source de la Verrerie?), pollution qui semble avoir partiellement disparu à cet endroit, alors qu'actuellement le maximum semble provenir de l'amont du Pont International. En l'absence d'un suivi plus régulier et d'une densification de prélèvements sur ce tronçon, nous voyons mal comment interpréter ces résultats de manière plus fiable. A noter encore que dans les échantillons historiques de 1963, seule une très faible proportion (0.014%) a été trouvée dans les rapides de la Rasse, tandis qu'en amont du lac de Biaufond, tant à la surface du sédiment que dans les sables littoraux, aucune forme tératologique n'a été décelée.

Une flore totale de 241 sortes de diatomées a été trouvée dans les 14 échantillons étudiés en 2011, dont 219 taxa benthiques et 22 taxa planctoniques. Cette flore représente le 70.3% de la flore des diatomées des rivières du canton de Neuchâtel, connue actuellement. Cette diversité floristique est en partie liée au fait que de longs tronçons de la rivière sont quasiment stagnants, voir stagnants en amont du lac des Brenets et dans les autres retenues (la diversité des diatomées est plus élevée dans les lacs que dans les rivières). On peut signaler, que cette forte diversité de diatomées rejoint la forte biodiversité des plantes à fleurs relevée le long de la vallée du Doubs (influences atlantiques, état des versants proches du naturel) par Druart & Heger 2010.

Prises isolément, les communautés épilithiques (9 échantillons) sont formées à 99% par 28 à 59 taxons (flores dominantes) ce qui est en moyenne nettement plus élevé que dans la grande majorité des rivières suisses (20 à 30 taxons dominants). Cette richesse floristique correspond à celle qui avait été trouvée dans les échantillons en 2005 et 2008, ainsi que dans les échantillons historiques de 1963. Par contre, la biodiversité structurale des communautés (degrés de spécialisation des communautés) est proche de la moyenne suisse, avec des valeurs d'indices de Shannon de 2,14 à 3,26. Dans cette série, la communauté la plus spécialisée a été trouvée à Amont Source Verrerie avec 28 taxons dominants et un indice de Shannon de 2,14. Les communautés épipéliques (5 échantillons) sont encore plus diversifiées avec des flores

dominantes de 47 à 83 taxons et dont les indices de biodiversité structurale varient de 2,32 à 3,67. Dans l'ensemble, des flores totales de 65 à 124 taxons ont été trouvées selon les stations. Pour juger de la valeur patrimoniale de ces peuplements, les communautés ont été analysées à la lumière de la liste rouge actuelle des diatomées d'Europe. Les résultats sont donnés sur la figure ci-après par l'abondance relative des espèces classées en fonction de leur degrés de raréfaction. Parmi les peuplements analysés cette année, les résultats trouvés dans des échantillons anciens ont été introduits, dont ceux de 1963. La composition des communautés épilithiques et épipélique est donnée respectivement en haut et en bas de la figure.

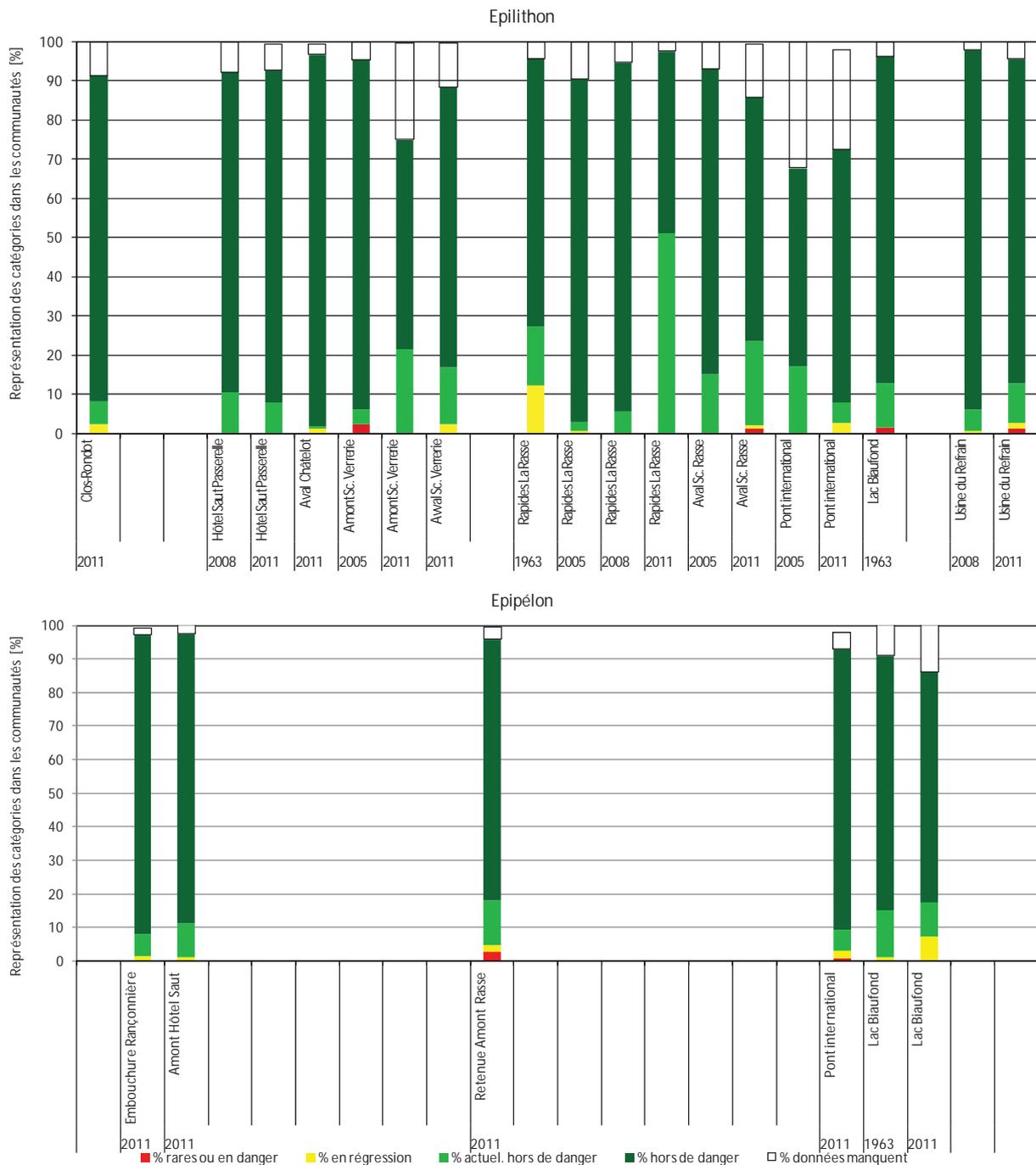


Figure 51 Taux de représentation (en % de cellules) des catégories de raréfaction selon la liste rouge des diatomées d'Europe centrale (Lange-Bertalot 1996) dans les communautés du Doubs. En haut pour l'eau courante enregistrés par l'épilithon, en bas à l'interface eau/sédiment enregistré par l'épipélon.

Actuellement, les diatomées hors de danger (vert foncé) ou qui semblent l'être encore actuellement (vert clair) dominent sur l'ensemble du tronçon comme dans la plupart des autres rivières du Jura et du Plateau suisse. Il n'y a pas grande différence à ce point de vue entre l'épilithon et l'épipélon. Une particularité est l'abondance entre la Verrerie et la Rasse, des espèces qui ne semblent pas en danger actuellement. A certains endroits, de petites proportions d'espèces en régression (< 3%) et même d'espèces en danger (< 3%) sont présentes. Un seul échantillon historique diffère nettement. Il s'agit de l'échantillon prélevé en 1963 à La Rasse et dont le 12% de la communauté est formé par l'espèce en régression *Achnanthydium subatomus*. A deux endroits en particulier (Amont Sc. Verrerie et Pont international), entre 20 à 30 % des communautés sont formées par des espèces dont on ne connaît pas encore bien la répartition (en blanc), à cause de confusions d'identification. Aux deux endroits il s'agit en premier lieu d'*Achnanthydium pfisterii*, espèce sensible qui a été décrite récemment.

Au Pont international, cette espèce est accompagnée par *Achnanthydium straubianum*, une espèce plus résistante, caractéristique de charge critique en matières organiques, mais aussi par les trois taxons très sensibles *Fragularia pinnata* var. *subrotundata*, *Gomphonema pumilum* var. *elegans* et *G. pumilum* var. *rigidum*. En 2005 à cet endroit, *Achnanthes straubianum* et *Fragilaria pinnata* var. *rotunda* étaient autant abondantes. Comme tendance générale, nous constatons qu'entre le Clos-Rondot et l'Aval de Barrage du Châtelot, les espèces rares et en danger sont peu abondantes, les communautés sont banalisées par les espèces hors de danger. Dès Amont Sc. Verrerie par contre jusqu'au Pont international, les peuplements sont plus diversifiés par une meilleure abondance de taxons plus fragiles, voire en danger. Dès le bassin de Biaufond, cette tendance régresse. On constate que même en 1963 à cet endroit les communautés n'étaient déjà pas très riches en espèces patrimoniales.

Parmi ces communautés épilithiques et épipéliques ont trouvé un certain nombre de diatomées planctoniques qui ont sédimenté. On ne peut pas les utiliser à elles seules pour estimer valablement la qualité des eaux. Cependant certaines espèces abondantes étant tellement caractéristiques des fleuves pollués et eutrophes d'Europe, qu'un court commentaire semble nécessaire. Parmi les espèces citées dans les travaux de l'Agence de l'Eau (2010 a et b), on trouve principalement *Discotella pseudostelligera*, *Cyclotella costei*, *Stephanodiscus minutulus* et *S. hantzschii*. Par contre en plus, d'autres espèces aussi très caractéristiques d'eaux dégradées à fortes variations de pression osmotique ont été trouvées également en abondance : *Cyclostephanos invisitatus*, *Cyclotella atomus*, *Cyclotella wuethrichiana*, *Stephanodiscus parvus* et *Thalassiosira pseudonana*. Nous sommes étonnés que les auteurs français ne les aient pas observées, d'autant qu'elles sont présentes depuis longtemps dans le lac des Brenets (Straub 1979 à 1989, non pub.). Par ailleurs, il faut aussi signaler que la plupart se retrouvent dans les échantillons historiques de 1963! Ces espèces sont considérées comme indicatrices de conditions de très forte eutrophie, voire de polytrophie. Nous avons aussi trouvé un certain nombre d'espèces d'eaux saumâtres, en moindre abondance il est vrai, mais pour la plupart qui sont absentes du réseau hydrographique du Jura et du Plateau neuchâtelois ou vaudois. Il s'agit de *Nitzschia aurariae*, *Nitzschia littoralis*, *Tabularia fasciculata* et de *Tabularia tabulata*. Il est connu que les fleuves pollués d'Europe abritent des espèces halophiles car la salinité de leurs eaux est plus élevée que dans les rivières moins polluées.

Au vu de cet état des peuplements de diatomées, en particulier en l'absence de pressions hydrologiques majeures, nous pouvons considérer que ces communautés enregistrent correctement les variations classiques de qualités d'eaux, tels que nous les présentons dans ci-dessous.

8.1.6 Indications de qualité biologique des eaux

L'indication de qualité des eaux courantes correspondant à la loi suisse est donnée par l'indice intégré DI-CH du SMG (étalonnage de 2006). Les valeurs trouvées sont distribuées sur la figure suivante d'amont en aval. Ces valeurs (en bleu) sont en principe correctes pour l'enregistrement effectué par l'épilithon. Sur ce graphe figurent également des valeurs que nous avons calculées à partir de l'épipélon de la surface des sédiments (en brun), pour comparaison, bien qu'en principe cet indice n'ait pas été étalonné avec ce type de communauté. Les variations de cet indice intégré de qualité des eaux correspondent aux indications obtenues pour le Doubs à partir des macroinvertébrés (indice IB-CH, p. 105).

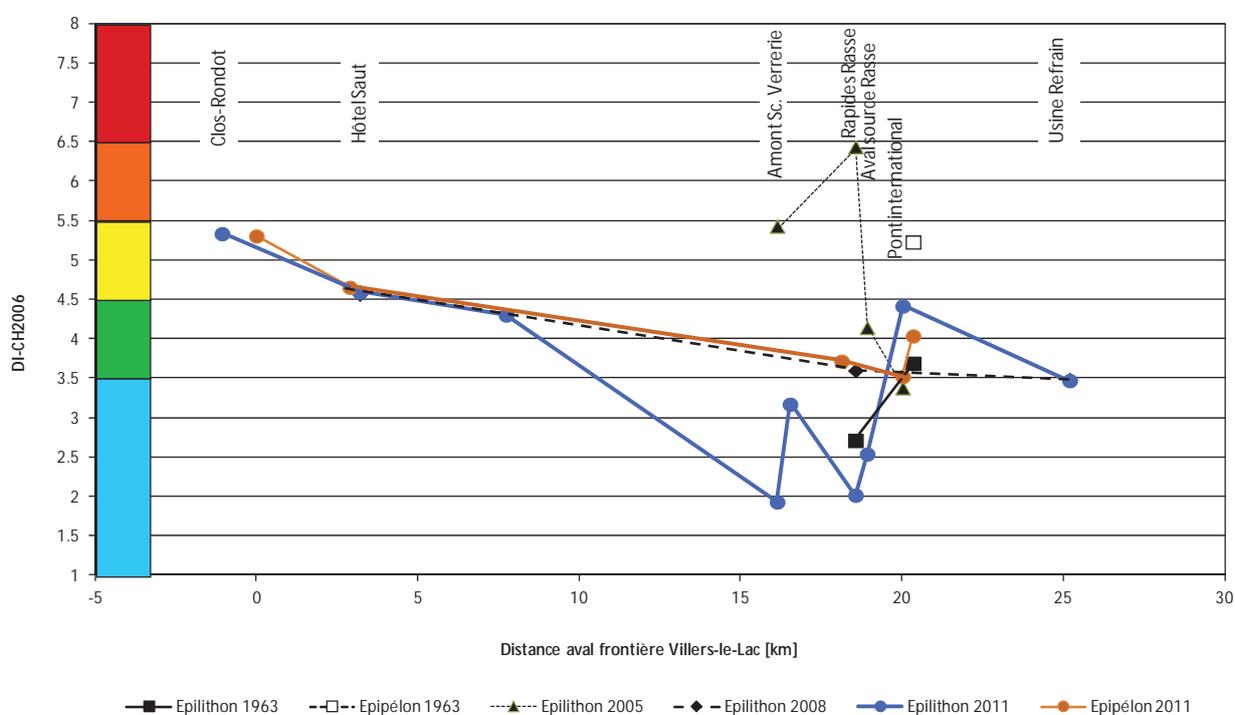


Figure 52 Distribution d'amont en aval des valeurs de DI-CH calculées à partir des communautés épilithiques et épipéliques de diatomées en 1963, 2005, 2008 et 2011. A gauche les cinq classes de qualité d'eau du SMG sont représentées par les couleurs standardisées.

Pour comparaison encore, nous avons superposé les valeurs trouvées à partir des échantillons d'épilithon historiques de 1963 et de ceux de 2005 et 2008. Une valeur provenant d'épipélon du Lac de Biaufond en 1963 complète la série. On constate globalement une amélioration des indices à mesure que l'on se déplace vers l'aval.

Au Clos-Rondot, les eaux courantes sont de qualité moyenne à la limite du médiocre. Elles ne correspondent pas aux objectifs écologiques légaux suisses. La valeur 5.3 de DI-CH trouvée est un peu plus élevée que la valeur de 4.9 calculée à partir d'un échantillon prélevé en 2004 par la DIREN à l'aval de la STEP de Morteau (DIREN Bourgogne 2005). Malgré une

amélioration, cette qualité encore moyenne se retrouve en aval à l'Hôtel du Saut, puis s'améliore encore légèrement après le lac de Moron, à l'aval du barrage du Châtelot, pour passer dans la classe des bonnes eaux correspondant à l'objectif légal. Plus en aval, on constate une nette amélioration, jusqu'à Amont Sc. Verrerie, où d'après cet indice les eaux deviennent de très bonne qualité. Plus en aval, les valeurs grimpent en dents de scie et indiquent progressivement que les eaux courantes se dégradent de nouveau, tout en restant de bonne qualité, mais passant à la limite du médiocre. Ce qui est bien visible, est la dégradation, qui s'observe à l'aval de la Source de la Verrerie, la première source nauséabonde, puis aussi à l'aval de la Source de la Rasse (la seconde source nauséabonde). La dégradation progresse encore au Pont international, certainement sous l'effet de l'effluent de l'Etang de Biaufond, qui lui aussi reçoit des eaux d'épurations de la Ronde. Par contre, dans les Rapides de la Rasse, en 2011, les eaux sont de très bonne qualité, c'est dire que la retenue de Maison Monsieur joue un rôle important dans l'abaissement de la charge polluante de l'eau courante. Dans les Rapides de la Rasse, la valeur de DI-CH de 2.02 trouvée en 2011 est nettement plus faible que les valeurs trouvées tant en 2005, que 2008, que même en 1963. La pollution que nous avons mise en évidence autour de ce site en 2005 a totalement disparu. En aval du Lac de Biaufond, les conditions s'améliorent de nouveau, puisqu'à l'Usine du Refrain, on retrouve des eaux de bonne à très bonne qualité, comme en 2008. La qualité des eaux à l'interface eau/sédiment, est de même qualité (moyenne) que les eaux de surface dans le lac des Brenets jusqu'au dernier bassin, ce qui contredit notre seconde hypothèse. Par contre dans la retenue de Maison-Monsieur, près de la surface du sédiment, l'eau est plus chargée que l'eau courante de surface telle qu'elle se déverse par dessus le seuil du barrage, dans le sens cette seconde hypothèse. Plus bas, les choses s'inversent de nouveau, mais de manière moins flagrante : les eaux proches du sédiment semblent d'un peu meilleure qualité que les eaux de surface. Il est intéressant de constater, que les eaux courantes en 1963 avaient une qualité proche de celle que l'on mesure actuellement près du Pont international de Biaufond (ce qui contredit notre première hypothèse). Par contre, à la surface du sédiment du lac de Biaufond, il semble que les eaux étaient nettement plus polluées en 1963 qu'actuellement (ce qui soutient cette première hypothèse). Enfin, il faut signaler, que de La Rasse au Lac de Biaufond, les valeurs de l'indice DI-CH sont proportionnelles aux taux de formes tératologiques trouvés en 2005 et 2011.

Les variations de concentrations d'engrais présents dans les eaux (principalement les taux de phosphore et d'azote) sont indiquées par l'indice trophique de Schmedtje *et al.* 1998 pour les eaux courantes. Cet indice n'est pas adapté au diagnostic des eaux stagnantes, mais nous l'avons tout de même calculé pour les eaux des interfaces eau/sédiment, pour permettre une comparaison entre les indications données par l'épilithon et l'épipélon. Les valeurs obtenues sont distribuées sur la figure ci-après. En comparant cette figure à la Figure 52, des variations de DI-CH, on voit que les variations de niveau trophique sont exactement proportionnelles à celles du DI-CH. Les endroits pollués sont riches en engrais, les diminutions de pollution se marquent par des baisses de l'indice trophique. Les sources nauséabondes enrichissent les eaux en engrais. Cette correspondance n'est pas étonnante, car les paramètres trophiques jouent un rôle important dans l'étalonnage de l'indice intégré DI-CH. La différence principale est celle de l'interprétation : la gamme de diagnostic du DI-CH indiquerait un intervalle de qualité plus large que l'indice trophique. En moyenne, en amont, les eaux du Doubs et du lac des Brenets seraient actuellement eutrophes à polytrophes,

encore proches de cet état en aval du barrage du Châtelot. Plus bas, leur charge moyenne diminuerait pour passer au statut de l'eutrophie. Ces indications correspondent aux mesures des paramètres trophiques (phosphates et nitrates) mesurés dans l'eau courante (chapitre 7.4.1 Nutriments dans les eaux courantes).

Dans leurs études des lacs de Chaillexon (des Brenets) et de Moron réalisées au cours de 2010 (Agence de l'Eau 2011a et b), de manière incertaine selon les méthodes d'analyses utilisées, les auteurs proposent un statut mésotrophe ou eutrophe pour le lac de Chaillexon et fortement eutrophe pour le lac de Moron.

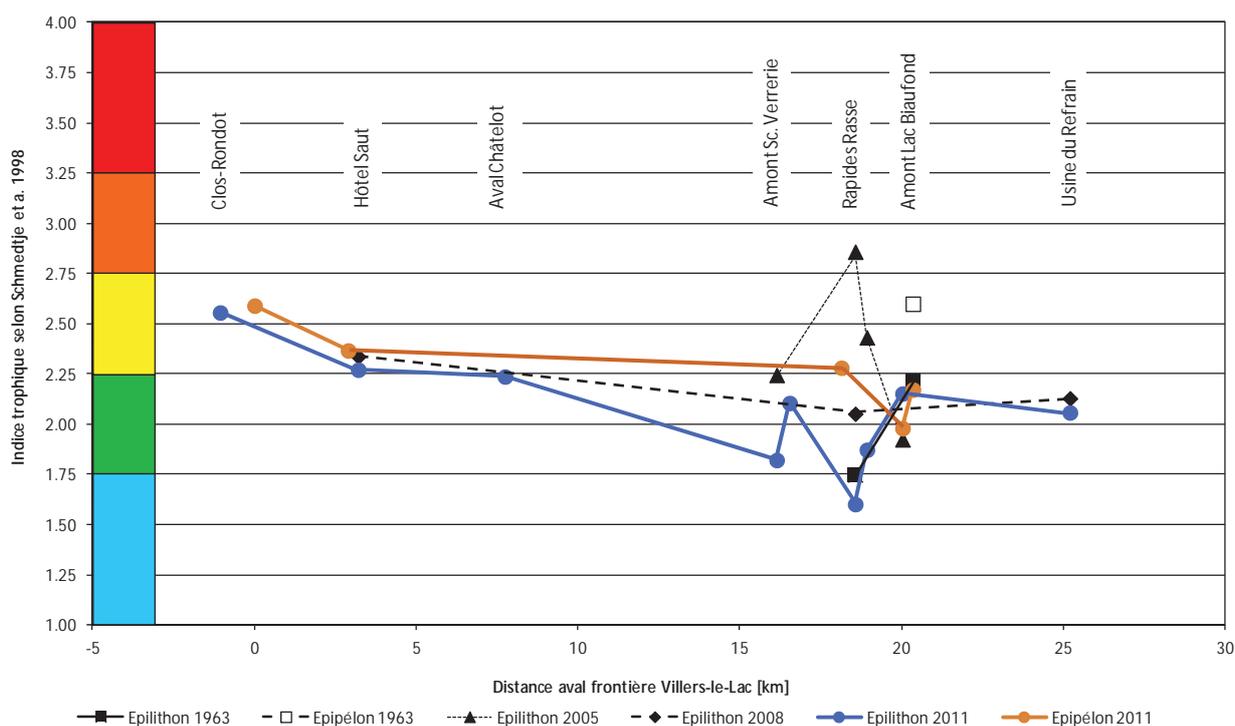


Figure 53 Distribution d'amont en aval des valeurs de l'indice trophique selon Schmedtje et al. 1998 calculées à partir des communautés épilithiques et épipéliques de diatomées en 1963, 2005, 2008 et 2011. A gauche les cinq classes de qualité d'eau du SMG sont représentées par les couleurs standardisées.

Leur évaluation est basée sur 4 campagnes de prélèvements de phytoplancton. Leur diagnostic correspond à notre indication relevée à l'aval du barrage du Châtelot à partir des diatomées du péripyton. Par contre, leur évaluation nous paraît sous estimée pour le lac des Brenets (à ce propos, voir la fin du paragraphe 8.1.4), car tant l'épilithon que l'épipélon aux deux extrémités du lac, indiqueraient plutôt des conditions eutrophes à polytrophes.

Pour estimer la charge saprobique des eaux (proportionnelle aux taux de matières oxydables), la composition des communautés de diatomées par groupes de résistance aux substances réduites, est présentée sur la figure suivante. La composition actuelle des communautés (colonnes avec point noir) est donnée par rapport aux échantillons ou résultats anciens que nous avons à disposition. Les communautés épilithiques qui donnent des indications pour les eaux courantes de surface sont données en haut de la figure. Les communautés épipéliques qui indiquent l'état des eaux à l'interface avec les sédiments sont données au bas de la figure.

REPUBLIQUE ET CANTON DE NEUCHÂTEL
Service de l'énergie et de l'environnement

Bassin du Doubs Neuchâtelois
Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface

Résultats des analyses du périphyton 2011
Indices DI-CH, Saprobie et Trophie

Echelle situation: -1:50'000 Unités: [-]
Echelle profil: - Altitudes: [-]

Auteur: AQUARIUS. BP 1767 CH-2001 Neuchâtel

Créé / modifié le:	Dessin:	Contrôle:
19.03.2012	JPL	BZA

Données cartographiques du SITN © 2010 / Service de la
Géomatique et du Registre Foncier
CP100 - Swisstopo © 2010

Légende

STEP, EqH

- ▲ 0 - 500
- ▲ 501 - 1000
- ▲ 1001 - 5000
- ▲ 5001 - 15000
- ▲ 15001 - 50000

Réseau hydrographique

Plans d'eau, bassins de retenue

Limite cantonale

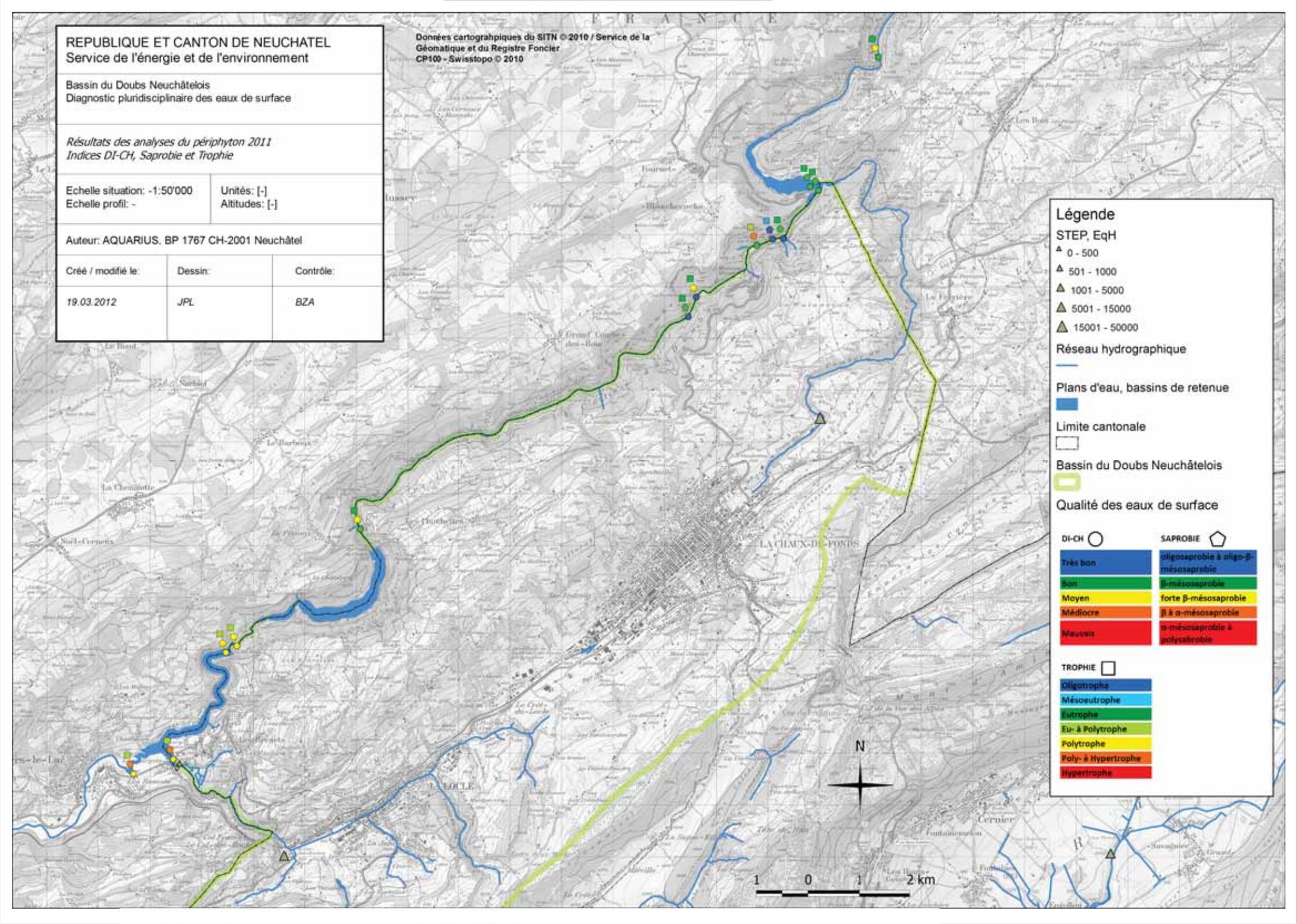
Bassin du Doubs Neuchâtelois

Qualité des eaux de surface

DI-CH ○	SAPROBIE ◡
Très bon	oligosaprobie à oligo-β-mésosaprobie
Bon	β-mésosaprobie
Moyen	forte β-mésosaprobie
Médiocre	β à α-mésosaprobie
Mauvais	α-mésosaprobie à polysaprobie

TROPHIE □
Oligotrophe
Mésotrophe
Eutrophe
Eu- à Polytrophe
Polytrophe
Poly- à Hypertrophe
Hypertrophe

1 0 1 2 km



Actuellement, au Clos-Rondot, la charge saprobique est excessive, de niveau critique II-III. Plus bas, de l'Hôtel du Saut jusqu'à l'aval du barrage du Châtelot, les eaux sont à peine moins chargées mais encore de niveau II-(III), niveau de forte β -mésosaprobie qui ne satisfait pas non plus les objectifs écologiques suisses. Cela correspond aux charges excessives de COD et d'ammonium mesurées à ces endroits (chapitre 7.4.1 Nutriments dans les eaux courantes).

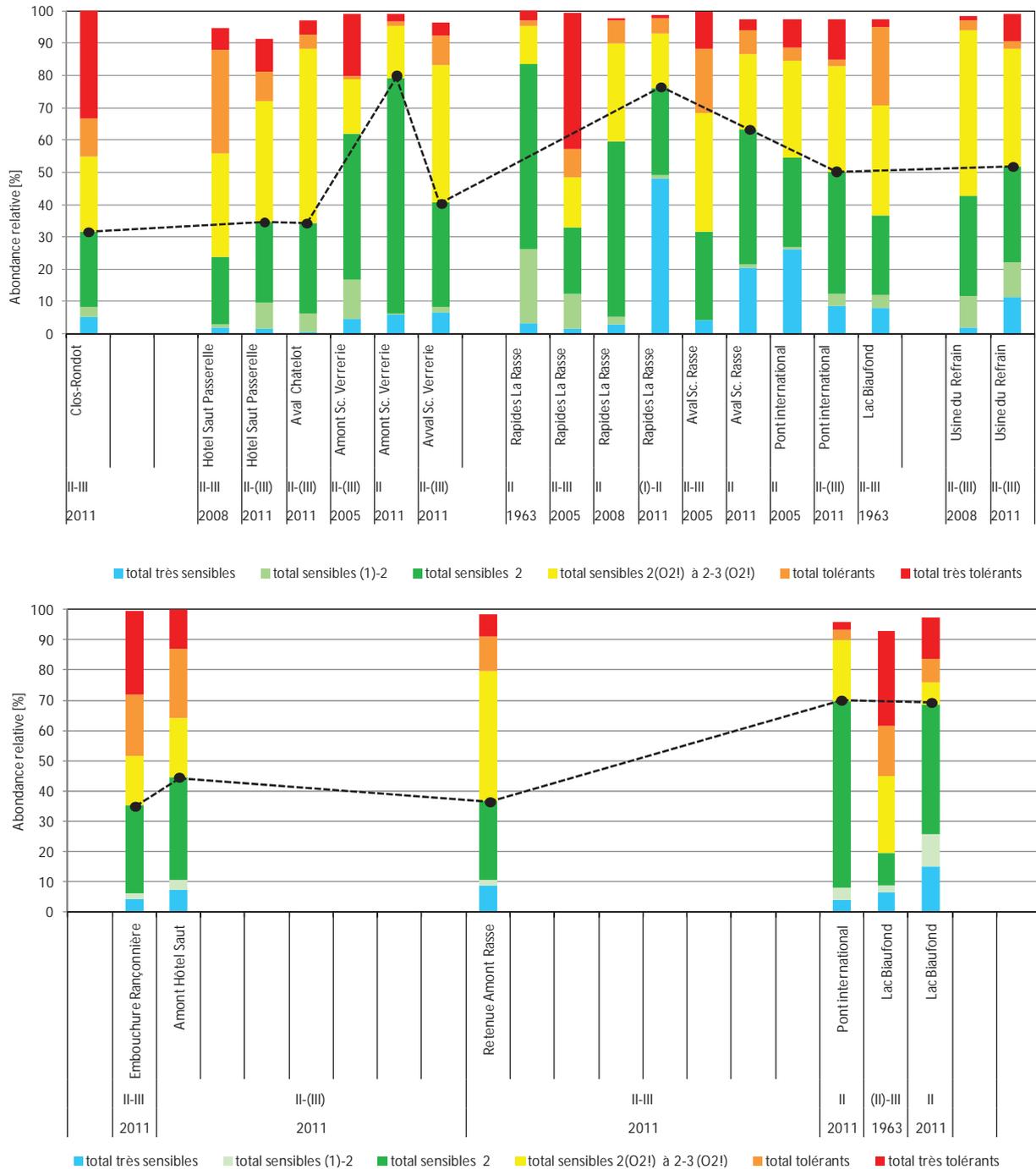


Figure 54 Composition des peuplements de diatomées par groupes de résistance saprobique. En haut, communautés épilithiques donnant l'indication de la qualité saprobique des eaux de surface. En bas, communautés épipéliques donnant l'indication de la qualité des eaux à l'interface eau/sédiment. Les classes de qualité sont données en chiffres romains de I à III selon le système de Liebmann 1958. Le trait noir relie les sommes des abondances relatives des groupes de diatomées indiquant le bon état écologique selon la loi suisse. L'objectif écologique est atteint (classes I et II) lorsque la somme de ces trois groupes forme au moins le 50% de la communauté de diatomées.

Vers l'aval, on constate une nette amélioration (autoépuration et/ou dilution), puisque en amont de la source de la Verrerie, la charge saprobique diminue nettement jusqu'en classe II (β -mésosaprobie correspondant aux objectifs légaux). Cette amélioration est marquée par l'augmentation remarquable de la représentation des espèces sensibles et la régression des proportions d'espèces résistantes.

En aval de la source de la Verrerie, la charge saprobique est de nouveau excessive de niveau II-(III), ce qui révèle l'impact des eaux d'épuration de la Chaux-de-Fonds. Le long du parcours jusqu'à la Rasse, les eaux s'améliorent de façon remarquable, puisque aux rapides, l'eau courante ne présente plus qu'une très légère β -mésosaprobie de classe (I)-II : la communauté est formée à près de 50% par des espèces très sensibles. Puis de nouveau, en aval de la source de la Rasse, la seconde source nauséabonde, la charge saprobique augmente (impact de La Chaux-de-Fonds) et se maintient jusqu'à l'usine du Refrain à un niveau II-(III) de forte β -mésosaprobie. Ces charges correspondent aussi aux teneurs de COD et d'ammonium mesurées en 2011. En général, ces charges saprobiques sont moindres que celles mesurées précédemment : à l'Hôtel du Saut par rapport à la mesure de 2008, à l'amont de la source de la Verrerie par rapport à 2005, aux rapides de la Rasse par rapport à 2008 et surtout par rapport à 2005, à l'aval de la source de la Rasse par rapport à 2005, à l'usine du Refrain par rapport à 2008. Les eaux de surface du lac de Biaufond en 1963 paraissaient également plus chargées qu'actuellement au pont international. Le seul cas de dégradation légère est donné par la mesure faite au pont international par rapport à celle de 2005.

La charge saprobique des eaux à la surface des sédiments est également excessive dans le lac de Brenets, dans le dernier bassin et aussi dans la retenue de Maison-Monsieur, en amont de la Rasse. Mais ces charges ne sont pas notablement plus élevées que celles des eaux de surface. Plus étonnante est la qualité des eaux à la surface des sédiments au pont international et dans le lac de Biaufond (β -mésosaprobie de classe II), qualité qui satisfait les objectifs écologiques suisses. Par contre, et c'est le plus intéressant, on voit qu'en 1963, à la surface du sédiment du lac de Biaufond, les eaux étaient nettement plus chargées.

8.1.7 Cyanobactéries (algues bleues) à la surface des sédiments

Les cyanobactéries trouvées à la surface des sédiments sont répertoriées pour chaque station (Tableau 21). L'espèce la plus courante presque partout rencontrée est *Phormidium* sp. 3. qui a également été retrouvée sur des galets en bordure des eaux (Les Graviers, I. Butty SENE, 9 juin 2010). Plutôt en aval du tronçon, nous avons retrouvé quelques peuplements assez denses d'*Oscillatoria limosa*, qui est l'espèce responsable des fleurs d'eau spectaculaires survenues à la Goule et dans le lac de Biaufond en 2003 lors de la canicule (Straub *et al.* 2004). Une fleur d'eau plus modeste probablement due à la même espèce a été signalée à l'aval des Graviers du 13 au 16 mai 2010 (D. Barruex), nos échantillonnages sur les galets des Graviers effectués le 9 juin 2010 ont confirmé la présence de ces filaments. A cette même date, de tels paquets flottants ont été observés dans le Lac de Biaufond (I. Butty, SENE), il s'agissait aussi de filaments sénescents d'*Oscillatoria limosa*. Sinon, nous n'avons trouvé que quelques filaments d'un autre *Phormidium* et de *Pseudanabaena catenata*. Les filaments d'Oscillaires ont été observés de manière détaillée. Dans aucun cas nous n'avons trouvé de filaments d'*Oscillatoria princeps*, cette espèce toxique qui

aurait été trouvée dans la Loue. En 2011, personne n'a signalé d'invasion de ce type le long du tronçon étudié.

Dates	lieu de prélèvement	<i>Oscillatoria limosa</i> Ag.	<i>Phormidium</i> sp. 3 (largeur 3.5 à 4 µm)	<i>Phormidium</i> sp. 2 (largeur 6.5 à 7 µm)	<i>Pseudanabaena</i> <i>catenata</i> Laut.
14.09.2011	Embouchure du Doubs dans le lac des Brenets		*		
14.09.2011	Aval de l'embouchure de la Rançonnière		*		
14.09.2011	En amont du seuil de l'Hôtel du Saut		**		
14.09.2011	Amont lac de Moron				
14.09.2011	Aval lac de Moron		*		
07.09.2011	Le Châtelard	***	**	*	
07.09.2011	En amont du seuil du pont de la Rasse				
07.09.2011	Pont International	**			*
07.09.2011	Haut fond en amont du lac de Biaufond	**	**	*	

Tableau 21 *Cyanobactéries trouvées à la surface des sédiments en 2011. Indications d'abondance : * = présent à 1 ou 2 individus, ** = moyennement abondant avec 3 à 20 individus, *** abondant avec 21 à 100 individus.*

S'il est bien connu que certaines souches d'*Oscillatoria princeps* peuvent être toxiques, c'est moins clair pour *Oscillatoria limosa*, bien que les fleurs d'eau de cette espèce sont connues depuis longtemps, lorsque les lacs suisses étaient bien plus eutrophes que maintenant (Thomas 1961). A l'heure actuelle à notre connaissance, quelques références existent, quand à l'éventuelle toxicité de cette espèce. Un cas dans les Alpes grisonnes laisse à penser que certaines souches de cette espèce peuvent produire des microcystines (Mez *et al.* 1998). Un cas a aussi été signalé dans le Tarn (Dumont 2006). Avec les deux autres taxons aussi très fréquents trouvés (*Phormidium* et *Pseudanabaena catenata*), certains cas de toxicité ont aussi été signalés (Dumont 2006). Pour le Doubs en 2011, la recherche de microcystines dans de l'eau et de la chair de poisson a donné des résultats négatifs. Malgré cela, l'hypothèse d'intoxication du poisson demeure et par simple précaution, mérite d'être documentée davantage.

8.1.8 Echantillons divers

Plusieurs échantillons isolés d'eau de surface ont été prélevés en 2010 et 2011 lors de phénomènes qui ont inquiétés la population et les autorités. Ces échantillons ont été examinés qualitativement (à 400x de grossissement) pour y chercher d'éventuelles cyanobactéries. En résumé, voici les résultats :

- > Dépôts épais vert noir de périphyton sur les galets aux Gravieres (prélèvement I. Butty, SENE, 9 juin 2010, réf. F-1259 in coll. F. Straub).
L'essentiel de la masse est due une espèce de cyanobactérie, le *Phormidium* sp.3. Quelques filaments d'*Oscillatoria limosa* ont été trouvés. Voir la discussion à la fin du § 8.1.6.
- > Paquets d'algues flottantes en bordure de la rivière aux Gravieres (prélèvement I. Butty, SENE, 9 juin 2010, réf. F-1261 in coll. F. Straub)
Les paquets sont dominés par une espèce d'algue jaune *Vaucheria* sp. Ce genre est typique des rivières eutrophes. Sinon ils contiennent aussi en grand nombre la cyanobactérie *Phormidium* sp. 3 commune dans le Doubs. Voir la discussion à la fin du § 8.1.6.
- > Paquets d'algues bleu-vert (peau de crapaud) flottant en surface du Lac de Biaufond (prélèvement I. Butty, SENE, 9 juin 2010, réf. F-1260 in coll. F. Straub)
Ces paquets contiennent presque exclusivement la cyanobactérie *Oscillatoria limosa*, qui en proliférant sur le sédiment, se détache et monte en surface. C'est le même phénomène que celui qui avait été observé en 2003 (Straub *et al.* 2004), mais en moins abondant. Voir la discussion à la fin du § 8.1.6.
- > Eau du lac de Moron à la crépine du barrage suite au signalement de poissons morts (prélèvement I. Butty, SENE et D. Frésard, SFMC, 10 juin 2010, réf. PI-1262 in coll. F. Straub, rapport Straub 2010)
Aucune cyanobactérie. Présence des algues planctoniques suivantes en concentration moyenne : diatomées mortes (*Cyclotella/Stephanodiscus* < 9 mm, *Cyclotella/Stephanodiscus* > 9 mm, *Stephanodiscus neoastraea*, *Fragilaria crotonensis*, *Diatoma tenuis*, *Asterionella formosa*, *Nitzschia* sp.), des algues vertes (*Chlamydomonas* < 11 mm, *Phacotus lenticularis*, *Scenedesmus magnus*, *Eudorina elegans*, *Oocystis* sp., *Hyaloraphidium contortum*, des algues brunes (*Gymnodinium helveticum*, *Gymnodinium lantzschii*) et des algues jaune dorées (Flagellés indét. 6-11 mm, *Mallomonas* sp.). Présence d'un protozoaire (*Staurophrya elegans*). Tous ces organismes sont communs dans la région, en suspension dans l'eau des lacs eutrophes (comme aux Brenets). Il n'y a pas d'organisme toxique dans cette liste.
- > Eau vert bouteille lors d'une fleur d'eau en amont du lac de Moron à La Roche (observation P. Malavaux, prélèvement M. Devaud et L. Giroud, 30 juin 2011, réf. PI-1363 et PI-1364 in coll. F. Straub, rapport Straub 2011)



Figure 55 Lac de Moron La Roche, 30.6.2011, photo. M. Devaud.

Cette fleur d'eau a été provoquée par les deux algues vertes communes *Carteria* aff. *sphaerica/multifilis* et *Phacotus lenticularis* qui se sont développées en masse. La fleur d'eau a probablement été déclenchée par la conjonction de la charge permanente excessive d'engrais dans l'eau du Doubs et de l'insolation cumulée à l'évaporation causées par cette période printanière caniculaire. Ces algues d'eaux eutrophes à hypertrophes ne sont pas toxiques mais peuvent donner un mauvais goût aux eaux de boisson.

- > Ecume stable de savon teintée par des algues et paquets d'algues flottantes au Moulin en amont du Saut du Doubs (prélèvement M. Devaud, 30 juin 2011, réf. PI-1361 et PI-1362 in coll. F. Straub, rapport Straub 2011)



Figure 56 Moulin du Saut, 30.6.2011, photo. M. Devaud.

Tant dans les paquets d'algues que dans l'écume stable les nombreuses espèces planctoniques déjà signalées ci-dessus et caractéristiques des lacs des Brenets et de Moron ont été retrouvées, broutées activement par des protozoaires, rotifères et crustacés. Les deux espèces responsables de la fleur d'eau au lac de Moron sont aussi présentes dans ces échantillons. Aucune cyanobactérie n'a été trouvée. De telles accumulations d'écume stable sont signe de graves pollutions ménagères ou industrielle.

- > Passées vert clair en surface du lac de Moron, poussées contre le barrage (prélèvement B. Zaugg, D. Frésard et F. Straub, le 14. 09. 2011, réf. PI-1385-3 in coll. F. Straub)

Aucune cyanobactérie. Présence en masse de l'algue verte *Phacotus lenticularis*, accompagnée par l'euglénien *Trachelomonas* sp., l'algue verte *Scenedesmus quadriacauda*, le cryptophyte *Rhodomonas lacustris*, le tout brouté intensément par le protozoaire *Limnostrombidium viridis*. Ces organismes sont communs également dans les lacs eutrophes.

- > Eau verte de la retenue située en aval du barrage du Châtelot vers chez Fasel (prélèvement L. Giroud autour du 20 octobre 2011 réalisé probablement en surface, réf. PI-1415 in coll. F. Straub)

Aucune cyanobactérie. Présence des algues suivantes en faible concentration : des diatomées centriques dont principalement *Cyclostephanos invisitatus*, des diatomées pennées (*Amphora pediculus*, *Cocconeis* sp., *Navicula* spp, *Navicula trivialis*, *Gomphonema* sp.), des algues vertes (*Chlorococcus* sp., *Crucigenia quadrata*, *Dictyosphaerium pulchellum*, *Hyalocardium* sp., *Kirchneriella lunaris*, *Phacotus lenticularis*, *Scenedesmus magnus*, *S. quadricauda*) et des algues conjuguées (*Closterium ceratium*, *Cosmarium laeve*). Ces algues planctoniques sont aussi communes dans les lacs eutrophes. Il est probable que l'aspect vert de l'eau n'était pas dû à des algues en suspension, mais aux algues fixées sur le fond vues en transparence (algues qu'il aurait fallu prélever pour en faire un examen). A noter qu'aucun cristal, ni de calcite, ni de silicate, n'a été trouvé dans cet échantillon. L'hypothèse d'une décharge sauvage de sédiment provenant du barrage doit être écartée.

8.1.9 Conclusion

Il est impossible de dresser un diagnostic général sur la qualité des eaux sur la base des diatomées car l'état des eaux varie remarquablement d'amont en aval. Si à certains endroits, les eaux sont effectivement trop chargées par rapport aux objectifs légaux suisses, le Doubs dans son ensemble ne peut pas être qualifié de "cloaque". A certains endroits en termes de concentrations, les eaux sont même de très bonne qualité par rapport à plusieurs tronçons de rivières jurassiennes (Seyon, Areuse) ou du plateau suisse (basse Broye).

Du Clos-Rondot, au lac des Brenets jusqu'à l'aval du barrage du Châtelot, les eaux sont de qualité médiocre sur le plan légal, trop chargées en engrais (eutrophes à polytrophes) et trop chargées en substances réduites (fortes β -mésosaprobie et même niveaux critiques), bien qu'une légère amélioration soit mesurable d'amont en aval. Théoriquement ce niveau de charge saprobique induit des déficits de 40 à 50% d'oxygène dissous, réduisant les possibilités de survie des salmonidés. Les retenues semblent jouer le rôle de bassin d'oxydation, comme le montre aussi la diminution des peuplements de bactéries fécales depuis les Brenets jusqu'au dernier bassin en amont de l'Hôtel du Saut (Annexe FS-4). Sur ce secteur, à tous les endroits des signes de toxicité sont relevés : taux relativement élevés de formes tératologiques et densité trop faible de diatomées au Clos-Rondot.

Dès l'aval du barrage du Châtelot jusqu'aux rapides de la Rasse, la rivière a tendance à effacer les signes de pollution, soit par dilution ou par autoépuration : les eaux sont de bonne qualité légale, leur charge trophique baisse au niveau eutrophe, même mésotrophe dans les rapides de la Rasse, leur charge saprobique baisse pour se situer en pleine β -mésosaprobie. Les polluants émis par la source nauséabonde de la Verrerie se marquent très nettement sur les peuplements de diatomées et sont sans doute toxiques : les valeurs de tous les indices croissent, la densité des diatomées est très faible, le taux de forme tératologique est plus élevé. Cependant, plus bas les conditions redeviennent normales.

Dès l'aval de la seconde source nauséabonde, mais surtout au Pont international et à l'amont du lac de Biaufond (ces stations sont sous l'impact des sources sous aquatiques polluées de l'étang de Biaufond), les conditions se dégradent de nouveau, mais sans atteindre le niveau de pollution observé en amont du lac des Brenets. Au Pont international, et en amont du lac de Biaufond, les eaux sont bonnes à médiocres (indice légal DI-CH), très fortement eutrophes, mais ont tendance à rester β -mésosaprobies. Théoriquement, le déficit en oxygène dissous ne devrait pas dépasser les 30%. Le plus remarquable au Pont international, est le taux de plus de 2% de formes tératologiques tant dans l'épithon, que dans l'épipélon. Cette observation montre que les eaux sont toxiques envers les diatomées à cet endroit.

A l'usine du Refrain, les conditions ont tendance à légèrement s'améliorer : disparition des formes tératologiques, légère baisse du niveau trophique.

Globalement sur l'ensemble du tronçon, la flore de diatomées est diversifiée et en bon état. Il n'y a pas de facteur hydrologique qui limite le développement des diatomées. Les communautés sont cependant dominées par des espèces banales. Les espèces de la liste rouge sont peu abondantes. Elles sont le mieux représentées entre l'amont de la source nauséabonde de la Verrerie et le Pont international.

Quatre espèces de cyanobactéries ont été trouvées : théoriquement toutes peuvent développer des souches toxiques. Mais ces quatre espèces sont banales dans le Doubs et aussi d'autres rivières du Jura et du Plateau suisse. La plus connue est *Oscillatoria limosa*, qui parfois cause des remontées sédimentaires spectaculaires. Par contre nous n'avons pas trouvé *Oscillatoria princeps*, qui a été mise en cause dans la Loue.

Les résultats obtenus en 2011 ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer entièrement les hypothèses que nous avons formulées au paragraphe 8.1.1. Pour les envisager, il faut différencier les types de polluants. Par ailleurs, ces hypothèses sont peut-être aussi un peu simplistes.

En première hypothèse, nous pensions que les eaux du Doubs étaient plus polluées avant la construction des STEP. Cela semble vrai au point de vue de la charge en matières organiques (niveau saprobique) dans le lac de Biaufond tels que nous le montrent les deux échantillons historiques de 1963 (Figure 54). Par contre au point de vue trophique, la charge en engrais à cet endroit n'a pas varié de manière significative. Dans les rapides de la Rasse, les eaux courantes en 1963 paraissent avoir été légèrement plus chargées en matières organiques qu'actuellement, mais nettement moins qu'en 2005! Au point de vue des facteurs tératogènes potentiels (nitrites, métaux lourds, micropolluants), ils semblaient quasiment

nuls en 1963, alors qu'actuellement, sur tout le cours en amont du Pont international ils sont présents de manière variable selon les lieux.

Notre seconde hypothèse formulait que dans les retenues les eaux à l'interface des sédiments étaient plus chargées en substances réduites que les eaux de surface. Cette affirmation n'est vérifiée qu'en amont des rapides de la Rasse, dans la retenue de Maison-Monsieur. Cela se marque à cet endroit par une valeur de DI-CH, un niveau trophique et une charge saprobique significativement plus élevés que dans l'eau courante (mesurés aux rapides de la Rasse). Par contre aux autres endroits, ni dans le lac des Brenets, ni dans celui de Biaufond, cette hypothèse ne se vérifie, les valeurs des indices entre l'eau de surface et l'eau proche des sédiments, ne sont pas significativement différentes.

La troisième hypothèse concernait l'impact négatif de la remise en suspension des sédiments lors d'évènements météorologiques particuliers (fortes insolation et hautes températures) comme pendant la canicule de 2003 ou en juin 2010 à Biaufond, qui ont causé probablement la mort de certains poissons. Nous n'avons pas eu à déplorer ce type de phénomène en 2011, même pas pendant la sécheresse d'avril à mai. Cet automne pendant la campagne de prélèvements, aucune formation de ce genre n'a été signalée. Nous n'avons donc pas de mesures pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

La dernière hypothèse met en cause les cyanobactéries (algues bleues) présentes dans le Doubs. Les espèces trouvées sont banales pour la région, nous les connaissons de longue date. Cependant, il n'est pas exclu, d'après la littérature, que certaines de ces espèces puissent développer des souches toxiques. Une recherche de microcystines dans l'eau et dans la chair de poissons morts a été réalisée en 2011, mais les résultats sont négatifs.

8.2 Macrofaune benthique

8.2.1 Généralités

Les méthodes permettant de décrire l'état biologique des cours d'eau sont essentielles à un bon contrôle de l'efficacité des mesures de protection des eaux. Les animaux vivant dans les ruisseaux ou les rivières et en particulier **les macroinvertébrés peu mobiles** qui en peuplent le fond reflètent l'intégralité des facteurs environnants qui agissent sur eux. Ceci est vrai non seulement pour la qualité de l'eau mais aussi pour les conditions morphologiques et hydrologiques et pour les processus dynamiques au sein du cours d'eau. La communauté biotique qui occupe un cours d'eau offre donc une bonne représentation de l'état général de l'écosystème aquatique et peut être utilisée comme un instrument de surveillance intégrée de l'état écologique du cours d'eau. Une bonne surveillance biologique peut contribuer à la mise en évidence de nuisances encore insoupçonnées et à une mise en œuvre rapide de mesures correctives adaptées.

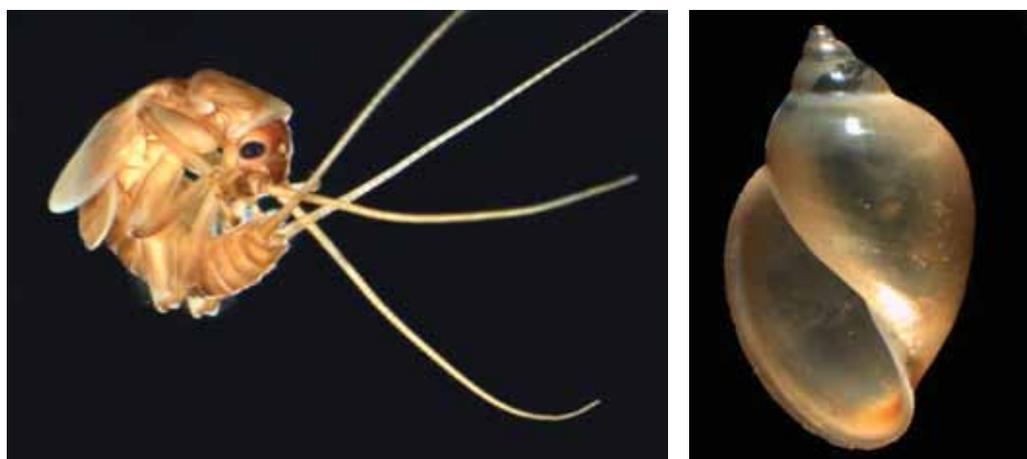


Figure 57 Macroinvertébrés benthiques : *Taeniopterygidae (Brachyptera risi)*, Plecoptère polluo-sensible (gauche) ; *Physidae (Haitia acuta)*, Mollusque polluo-résistant (droite).

8.2.2 Suivis et données existantes

8.2.2.1 Stations analysées en 2011

no	Rivière, localité	Code	Date	Canton	CoordX	CoordY	Altitude
1	R. Combe des Enfers	DOU_05	22.04.2011	NE	549050	213176	940
2	R. Combe Girard	DOU_04	22.04.2011	NE	548500	212545	920
3	Bied du Locle	DOU_02	22.04.2011	NE	546485	211425	915
4	Rançonnière, UE Le Locle	NE_2408	21.04.2011	NE	544990	211595	823
5	Rançonnière, Les Pargots	NE_2406	21.04.2011	NE	543520	212775	760
6	Doubs, Saut du Doubs	NE_2405	21.04.2011	NE	544983	215320	736
7	Doubs, Les Gravieres	NEW1	17.04.2011	NE	551520	219980	618
8	Doubs; La Rasse	NE_2404	17.04.2011	NE	555060	222896	610
9	Ronde	DOU_01	22.04.2011	NE	555780	220200	941
10	Doubs, Le Refrain TCC	NE_2401	17.04.2011	NE	557170	226420	550

Tableau 22 Diagnostic Doubs, liste des stations examinées dans le Doubs et ses affluents.

Les stations analysées dans le cadre de ce diagnostic du Doubs correspondent à celles de la routine 2011 pour les analyses physico-chimiques et les indices diatomiques selon les coordonnées transmises par le SENE. D'entente avec le mandant, une station située à l'aval de l'usine hydroélectrique du Châtelot a été ajoutée (station 7, « Les Graviers »).

8.2.2.1 Données existantes

> **Données IBGN-IBCH** : les données existantes relatives aux relevés du macrozoobenthos dans le bassin versant du Doubs sont peu fournies et relativement hétérogènes quant à la saison d'échantillonnage.

Cours d'eau	Lieux-dit	Coord. X	Coord. Y	Indice IBGN	Date	Année
La Rançonnière		543522	212777	3	15.11.2005	2005
La Rançonnière	Le Locle, aval station limnim.	545000	211581	1	15.11.2005	2005
La Rançonnière	Le Locle, aval station limnim.	545000	211581	1	03.12.1993	1993
La Rançonnière	Le Locle, aval station limnim.	545000	211581	1	19.12.1996	1996
La Ronde		555780	220200	3	15.11.2005	2005
Le Bied du Locle	Le Locle, amont de la STEP	547720	211140	3	03.12.1993	1993
Le Bied du Locle	Le Locle, amont de la STEP	545720	211140	4	19.12.1996	1996
Le Bied du Locle		545720	211140	4	15.11.2005	2005
Le Bied du Locle	Le Locle, devant Rolex	546720	211550	11	19.12.1996	1996
Le Bied du Locle		546700	211525	4	15.11.2005	2005
Le Doubs	La Rasse, aval du pont	554830	222820	11	03.12.1993	1993
Le Doubs	La Rasse, depuis le pont	554830	222820	5	19.12.1996	1996
Le Doubs	Aval barrage Châtelot TCC	549042	219095	18	26.04.2010	2010
Le Doubs	Aval barrage Châtelot TCC	549063	219113	17	18.04.2010	2010
Le Doubs	Aval usine Châtelot	549845	219260	17	18.04.2010	2010
R. de la Combe des Enfers		549050	213176	7	15.11.2005	2005
R. de la Combe Girard		548500	212543	9	15.11.2005	2005
Ruisseau des Combes		545610	210650	6	15.11.2005	2005
Ruisseau des Combes		545610	210650	11	29.09.2008	2008

Tableau 23 Relevés du macrozoobenthos effectués entre 1993-2010 dans le bassin versant du Doubs.

Comme démontré lors du test méthodologique effectué dans le cadre de la mise en place de l'IBCH (Stucki & al., 2008), la saison est le 1^{er} facteur influençant les résultats des analyses après la station. L'IBCH propose de ce fait des fenêtres de prélèvement standardisées par tranche d'altitude. En effet, seule une standardisation des dates d'échantillonnages permet de garantir la reproductibilité des données collectées dans le cadre des programmes de surveillance des eaux de surface. En reprenant ces recommandations, les prélèvements sur les stations neuchâtelaises s'effectuent dès 2009 essentiellement entre les mois de mars et avril en tenant compte des caractéristiques climatiques (températures moyennes) et hydrologiques (périodes de précipitations prolongées) de l'année en cours (cf. § 8.2.3.1 IBCH).

NB : Cette période d'échantillonnage permet de placer la station dans son potentiel. Des échantillonnages complémentaires effectués à d'autres périodes doivent être fixés en fonction des dysfonctionnements à mettre en évidence (not. à l'étiage estival ou hivernal).

IBCH_JU Fenêtres de prélèvement

Mois	Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre		
15aines / Altitude	01.- 15.	16.- 31.	01.- 15.	16.- 28.	01.- 15.	16.- 31.	01.- 15.	16.- 30.	01.- 15.	16.- 31.	01.- 15.	16.- 30.	01.- 15.	16.- 31.	01.- 15.	16.- 31.	01.- 15.	16.- 30.	01.- 15.	16.- 31.	01.- 15.	16.- 30.	01.- 15.	16.- 31.	
200-600 m				T	F	F	T																		
601-1000 m						T	F	F	T																
1001-1400 m							T	F	F	T															
1401-1800 m								T	F	F	T														
>1800 m									T	F	F	T													

1
2
3
4
5

F Fenêtre de prélèvement
T Tampon pour situation hydrologique particulière

Tableau 24 Fenêtres d'échantillonnage prioritaires en fonction de l'altitude selon Stucki, 2010.

Les listes faunistiques à la base du calcul des indices ne sont pas systématiquement disponibles dans les rapports sectoriels. Ces listes fournissent pourtant des informations fondamentales permettant des interprétations et des analyses plus poussées. On trouvera de telles listes dans l'annexe PS-1 pour les sites étudiés en 2011.

Les méthodes françaises (IBGN, MAC 20, RCS) ne fournissent pas de directives strictes concernant l'application de fenêtres de prélèvement. Les données récentes disponibles de 9 stations d'échantillonnage réalisés entre septembre 2003 et juin 2004 sur le Doubs français et franco-suisse montrent clairement la variabilité décrite précédemment (EPTB, 2011). Les comparaisons entre jeux de données provenant de prélèvements effectués à différentes saisons et étalées sur plusieurs années s'avèrent difficiles.

> **Données EPT** (groupes sensibles des Ephémères, Plécoptères, Trichoptères): les données faunistiques à l'espèce à disposition se limitent aux travaux de Verneaux (1973) et aux inventaires réalisés dans le cadre de la réactualisation des « listes rouges » du Centre suisse de cartographie de la faune (Lubini et al. 2012).

8.2.3 Méthode utilisée pour le diagnostic

8.2.3.1 IBCH

L'Indice Biotique CH ou **IBCH** est fondé sur l'examen du macrozoobenthos (faune des macroinvertébrés inféodés au substrat) pour déterminer la qualité biologique d'un cours d'eau. L'indice, d'une valeur de 0 à 20, est basé sur la présence ou l'absence de certains taxons bioindicateurs polluo-sensibles (p.ex. Plécoptères) ou polluo-résistants, combiné à la diversité des taxons observée. L'intérêt essentiel de l'utilisation de l'**IBCH** réside dans sa capacité à caractériser la perturbation d'un milieu aquatique par ses effets et non par ses causes. Ainsi, c'est un des seuls moyens à disposition pour identifier une pollution passée (diminution du nombre d'individus ou disparition de certaines espèces d'invertébrés), ce qui n'est pas réalisable à partir d'une analyse physico-chimique de l'eau. L'IBCH permet également:

- > de situer la qualité biologique d'un site d'eau courante dans une gamme typologique générale ;
- > de suivre l'évolution de la qualité biologique d'un site au cours du temps et/ou dans l'espace (amont / aval) ;

- > d'évaluer l'effet d'une perturbation (exemples : un rejet, une modification du régime d'écoulement) ou d'une mesure de revitalisation sur le milieu.

Le répertoire des organismes retenus pour le calcul de l'**IBCH** contient 142 taxons. L'unité taxonomique généralement retenue est la famille. Parmi les 142 taxons, 38 sélectionnés comme indicateurs se répartissent dans 9 groupes de qualité. Les résultats obtenus s'échelonnent de 0 (mauvaise qualité biologique) à 20 (très bonne qualité biologique).

20-17	16 – 13	12 – 9	8 – 5	4 - 1
I	II	III	IV	V
très bonne	bonne	moyenne	médiocre	mauvaise

Tableau 25 Classes de qualité de base de l'IBGN selon la norme AFNOR NF T 90-350 reprise par l'IBCH (Stucki, P. 2010).

L'**IBCH**, méthode standard suisse pour la surveillance des eaux de surface³⁰ diffère de l'IBGN, standard français dont elle dérive, principalement pour les éléments suivants :

- > outil de prélèvement de type haveneau utilisable en Kicknet selon le standard européen AQEM (cadre 25x25cm, filet 500µ) ;
- > grille d'échantillonnage IBGN remaniée en fonction du nouvel outil de prélèvement ;
- > fenêtres de prélèvement des campagnes de terrain précisées en fonction des altitudes et des régimes d'écoulement ;
- > détermination de la faune aquatique jusqu'au niveau taxonomique requis (selon le protocole de laboratoire³¹).

Depuis 2008, les prélèvements du macrozoobenthos du canton de Neuchâtel ont été adaptés aux caractéristiques de l'**IBCH**; une adaptation stricte aux fenêtres de la méthode a été effectuée par le Canton dès 2011. Cette même année, un certain nombre de cantons ont adapté leur réseau de surveillance des cours d'eau à ce nouveau standard (GE, VD, VS, FR, NE, AG, ZH, JU, LU). Dès 2012, la Confédération (OFEV, Section Eau) applique la méthode de l'IBCH dans le cadre du lancement d'un réseau de surveillance national (NAWA) comprenant environ 100 points de surveillance.

8.2.3.2 *SPEAR index*

Le **SPEAR-INDEX** (Species At Risk) est un système de bioindication permettant la prise en compte des atteintes écologiques sur les cours d'eau liées à une série de substances toxiques. Elle se base sur les caractéristiques biologiques des organismes benthiques (Beketov & Liess, 2008; Liess & al. 2008). Les caractéristiques utilisées tiennent notamment compte de la résistance/sensibilité des organismes à la présence de pesticides (sensibilité physiologique) et du potentiel de rétablissement (temps de génération, etc...).

³⁰ Manuel méthodologique téléchargeable sous : <http://www.modul-stufen-konzept.ch/f/index-f.htm>

³¹ www.modul-stufenkonzept.ch/download/MZB/Laborprotokoll_F_20111107.xls

Le SPEAR-INDEX est appliqué scientifiquement depuis plusieurs années dans les pays de la communauté européenne (majoritairement en Allemagne et en Autriche). Il est actuellement testé par 9 cantons suisses dans le cadre d'un projet InterReg (indice écotoxicologique pour l'évaluation des cours d'eau du bassin versant du lac de Constance [InterReg IV Projektnr. 227]).

Les données faunistiques récoltées dans le cadre des relevés IBCH sont entièrement compatibles et peuvent être directement utilisées pour le calcul de cet indice moyennant la prise en compte des abondances de chaque taxon.

8.2.3.3 *Listes rouges des macroinvertébrés benthiques EPT*

Le matériel récolté lors des échantillonnages IBCH a été envoyé à différents spécialistes pour la détermination à l'espèce des groupes EPT : Ephémères, Plécotères, Trichoptères. Ces 3 ordres d'insectes contiennent les taxons les plus polluo-sensibles et font l'objet d'une attention particulière dans le suivi des cours d'eau et de leur biodiversité. Les listes rouges EPT publiées en avril 2012 (Lubini et al. 2012) reprennent les statuts des espèces déjà disponibles dans la publication des espèces prioritaires (OFEV 2011). Une comparaison avec les données historiques (Verneaux 1973) et les données archivées dans le cadre des travaux de réactualisation des listes rouges des organismes aquatiques (CSCF 2002-2009) a été effectuée.

8.2.3.4 *Archivage des données (contrôle qualité)*

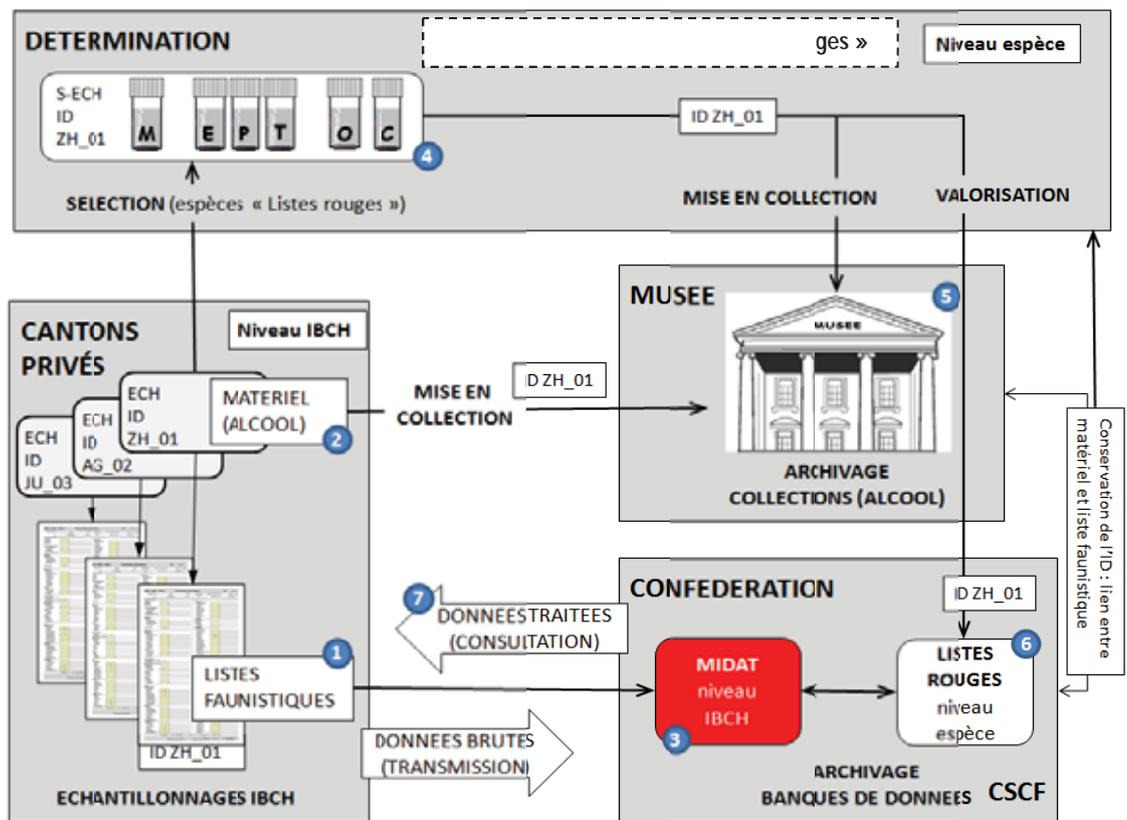
Le matériel récolté dans le cadre du programme de surveillance cantonal des cours d'eau à l'aide du macrozoobenthos suit une procédure d'archivage et de contrôle qualité mis en place par la Confédération. Les données faunistiques sont centralisées au Centre suisse de cartographie de la faune dans la BD MIDAT et la BD des espèces. La figure suivante détaille les différentes étapes de la procédure, à savoir :

- ① La transmission des données brutes se fait sous forme de listes faunistiques (protocole IBCH avec calcul automatique intégré);
- ② le matériel en alcool correspondant (même identificateur ID sur la liste faunistique correspondante) est transmis pour archivage au Musée zoologique de Lausanne;
- ③ une procédure automatisée insère les données des listes faunistiques (protocoles IBCH) dans la BD MIDAT ; contrôle qualité : un contrôle de routine (filtres) vérifie et valide les données entrées (coordonnées, ID, altitudes) ; la feuille de protocole est protégée contre toute modification et des pointages de plausibilité sont effectués sur les listes faunistiques (plausibilité des taxons en fonction des coordonnées/altitudes) ;
- ④ la valorisation du matériel IBCH (détermination à l'espèce) touche une sélection des échantillonnages annuels (ensemble du matériel pour ce projet) ;
- ⑤ le matériel en alcool IBCH et le matériel valorisé à l'espèce sont archivés de manière coordonnée ; contrôle qualité : correspondance matériel <-> BD. En cas de doute sur

la plausibilité (en 3), le matériel peut-être demandé au MZL et la détermination vérifiée ;

- 6 les données listes rouges issues de la valorisation à l'espèce sont insérées dans la BD espèce du CSCF ; contrôle qualité : correspondance BD espèces <-> MIDAT.
- 7 les données traitées peuvent être consultées par les fournisseurs d'informations ou par des tiers (consultation directe par accès sécurisé ou demande d'extraction de données auprès du CSCF).

La participation à cette procédure permet : a) un contrôle qualité indépendant sans charge financière supplémentaire pour le projet, b) une conservation à long terme du matériel archivé.



Circulation des données et du matériel IBCH déterminés entre Cantons, Confédération et Musées

8.2.4 Résultats

8.2.4.1 IBCH

Les stations d'échantillonnages placés sur le cours du **Doubs** se situent généralement dans la classe de qualité I (très bonne) et II (bonne). En appliquant un test de robustesse qui consiste à retirer le taxon le plus sensible présent dans l'échantillon, ces stations se maintiennent dans ces 2 classes de qualité. En observant les listes faunistiques à la base de l'indice, on remarquera que les notes élevées obtenues proviennent essentiellement de la diversité exceptionnelle de taxons qu'héberge le Doubs. Celle-ci compense la pauvreté des groupes indicateurs polluo-sensibles présents dans l'échantillon. Ces valeurs correspondent à celles

obtenues lors des études effectuées en 2010 à l'aval du barrage du Châtelot et en 2011 sur le Doubs jurassien. Seule la station du « Saut du Doubs » obtient une valeur nettement plus basse, une valeur à mettre en relation avec la dégradation du milieu dû à l'influence du Lac des Brenets. D'après les analyses effectuées sur les diatomées la qualité des eaux est médiocre entre Clos-Rondot et le barrage du Châtelot et de forte bêta-mésosaprobie près de la limite critique (cf. chapitre 8.1.8 Echantillons divers). Malgré une situation très particulière de ce secteur du Doubs entre le lac des Brenets et la retenue de Moron, les débits peuvent y être considérés comme « naturels » et ne devraient donc pas influencer les résultats obtenus.

La situation du Doubs contraste avec celle de ses affluents : 1° La **Rançonnière** à l'aval de l'usine hydroélectrique qui n'héberge pas de macrofaune en raison des débits temporaires liés à l'exploitation par turbinage aux heures de pointe ; 2° La **Rançonnière** à l'aval de la STEP des Brenets qui affiche une valeur très basse ; 3° La **Ronde** à l'aval de la STEP de la Chaux-de-Fonds qui est alimentée à 100% (situation avril 2011) par les eaux traitées de la ville. Toutes ces stations entrent dans la classe V (très mauvaise). Ces résultats confirment les données de la physico-chimie (cf. chapitre 7.4 Résultats physico-chimiques).

Stations	Cbe des Enfers_DOU05	Cbe Girard_DOU04	Bied du Locle_DOU02	Rançonnière_UJ_NE2408	Rançonnière_Pargols_NE2406	Saut du Doubs_NE2405	Doubs, Les Gravières_NEW1	Doubs, La Rasse_NE2404	Ronde_STEP_IBCH_DOU01	Doubs_Refrain_TCC_NE2401
Richesse taxonomique	23	23	16	0	7	19	40	37	9	35
Classe de variété	7	7	5	0	3	6	11	11	3	10
Groupe indicateur le plus élevé	7	7	6	0	1	2	9	6	2	9
IBCH	13	13	10	0	3	7	19	16	4	18
robustesse	12	12	6	0	3	7	16	16	3	15
Classe de qualité	II	II	III	V	V	IV	I	II	V	I

Tableau 26 IBCH, résultats synthétiques par station de cours d'eau. Classes de qualité biologique : I très bonne (bleu), II bonne (vert), III passable (jaune), IV mauvaise (orange), V très mauvaise (rouge).

Le Bied du Locle présente un cas particulier. Ses affluents avant leur écoulement souterrain sous la ville obtiennent des bonnes valeurs mais la qualité biologique du cours d'eau chute fortement 100 mètres à l'aval de sa sortie du voûtage (avant rejet de la STEP). En appliquant le test de robustesse, cette station chute de 4 points et entre dans la classe IV (mauvaise).

8.2.4.2 *Spear Index*

Les tendances observées dans la qualité biologique des cours d'eau par le calcul de l'IBCH sont renforcées par le SPEAR-Index. Cet indice permet une appréciation plus fine de la situation écotoxicologique (micropolluants et pesticides) par rapport à l'IBCH, indice particulièrement sensible à la charge organique du cours d'eau. Les résultats mettent en évidence les stations touchées par les rejets urbains, industriels et agricoles. Le Bied du Locle à l'aval du voûtage confirme sa mauvaise valeur obtenue par le test de robustesse sur l'IBCH.

Stations	Cbe des Enfers_DOU05	Cbe Girard_DOU04	Bied du Locle_DOU02	Rançonnière_UE_NE2408	Rançonnière_Pargots_NE2406	Saut du Doubs_NE2405	Doubs, Les Graviers_NEW1	Doubs, La Rasse_NE2404	Ronde_STEP_IBCH_DOU01	Doubs_Refrain_TCC_NE2401
SPEARpesticides Index	36.8	35.1	21.1	0.0	0.0	13.0	33.3	31.6	2.0	45.6
SPEARorganic Index	-0.59	-0.44	-0.6	-	-0.52	-0.72	-0.53	-0.59	-0.92	-0.5
Classe de qualité SPEAR	good	good	poor	-	bad	poor	good	mod.	bad	high
IBCH (comparaison)	13	13	10	0	3	7	19	16	4	18

Tableau 27 Evaluation des stations analysées à l'aide des SPEAR-Index. Indication de la qualité biologique de chaque station vis à vis de son exposition aux pesticides et autres substances toxiques. Comparaison avec les indices IBCH obtenus.

Ces résultats peuvent être mis en parallèle avec les données sur le taux de formes tératologiques chez les diatomées (cf. Figure 50, p. 83). En 2006, Straub obtient également des taux très élevés dans la Ronde, comme indicateurs de toxicité (Straub et Jeannin 2006). En revanche ces formes étaient peu fréquentes dans la seule étude disponible pour le Bied du Locle et la Rançonnière (Straub 2005). NB : Cet indice n'est pas encore étalonné pour la Suisse. Une première carte d'état existe pour l'ensemble des pays de la communauté européenne. Une étude de faisabilité est en cours dans 7 cantons de Suisse orientale [InterReg IV Projekt nr. 227]. Les échantillonnages IBCH sont compatibles pour le calcul de cet indice.

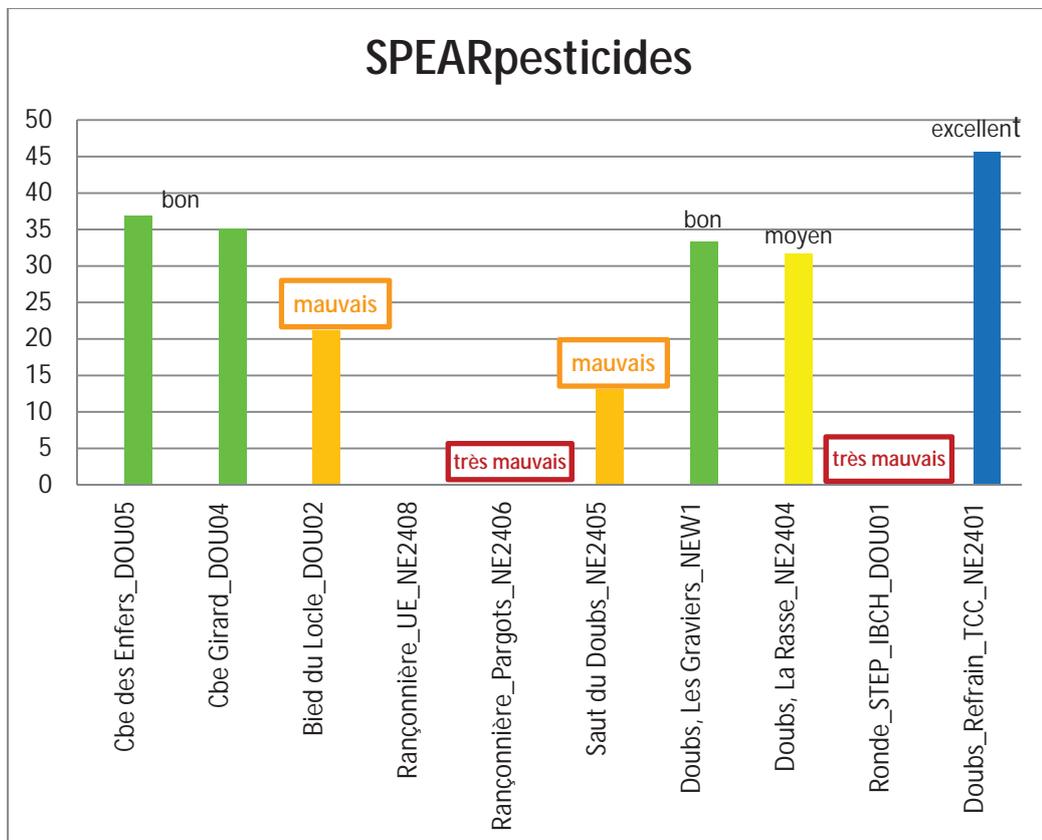


Figure 58 Evaluation des stations analysées à l'aide des SPEAR-Index. Indication de la qualité biologique de chaque station vis à vis de son exposition aux pesticides et autres substances toxiques.

8.2.4.3 *Listes rouges des macroinvertébrés benthiques EPT*

Les données à disposition du canton de Neuchâtel, soit 4'500 individus de 49 espèces et complexes d'espèces déterminés, figurent dans le tableau ci-après (Tableau 28, p. 108).

Ephemeroptera : La liste rouge des Ephémères de 2012 compte 86 espèces, parmi lesquelles 40% ont un statut d'espèce menacée. Les prélèvements de la routine 2011 sur le Doubs et ses affluents recelaient 15 espèces d'éphémères dont une est considérée comme très menacée (EN) et deux comme menacées (VU). *Caenis rivulorum* (EN) n'est connue que de quelques grandes rivières telles la Thur, la Töss, l'Orbe et la Broye. Elle semble en régression dans ces deux dernières. Sa disparition de nombreux sites anciennement colonisés et les faibles effectifs des quelques populations encore existantes en Suisse rendent son statut national alarmant (Lubini et al. 2012). *Caenis rivulorum* présente des densités remarquables dans les tronçons à courants rapides étudiés dans le Doubs. Verneaux (1973) ne signale pas cette espèce dans les tronçons étudiés. *Baetis buceratus* colonise presque exclusivement les cours d'eau de basse altitude, elle est considérée comme menacée. *Torleya major* s'est raréfié ou a disparu dans plusieurs petits cours d'eau de Suisse occidentale (Lubini et al. 2012). Sa présence dans le Doubs est signalée par Verneaux (1973). Les très faibles densités d'espèces de la famille des Heptagenidae contrastent avec les observations de l'auteur. Insectes de grande taille, adaptées aux courants rapides, leur régression pourrait être mise en relation avec l'impact des éclusées. Une hypothèse qui s'appuie notamment sur les changements rapides et très fréquents dans la répartition spatiales des vitesses d'écoulement nécessitant des déplacements importants pour les espèces les plus rhéophiles.

Plecoptera : La liste rouge des Plécoptères à paraître en 2012 compte 111 espèces. Dans le cadre de la routine 2011, 3 espèces ou complexe d'espèces dont aucune appartenant aux listes rouges ont été recensées. Verneaux (1973) mentionne 15 espèces dans le lieu-dit « Les Gravier ». Les grandes espèces de perle semblent avoir reculé dramatiquement sur le Doubs Franco-Suisse. Cette observation corrobore les nombreux témoignages obtenus auprès des pêcheurs durant les campagnes de terrain. *Siphonoperla torrentium* est la seule perle de taille moyenne se maintenant bien sur les secteurs étudiés. Sa morphologie particulière lui permet probablement de pénétrer plus profondément dans le lit du cours d'eau afin de se mettre à l'abri du dessèchement temporaire caractérisant les zones de marnage.

Trichoptera : La liste rouge des Trichoptères compte 302 espèces dont 50% sont menacées. Aucune espèce menacée n'est à signaler parmi les 20 espèces recensées.

La comparaison avec les travaux de Verneaux (1973) pour la station « Les Gravier » montre clairement les changements apparus dans les communautés de macroinvertébrés. Les plécoptères constituent le groupe le plus touché. La présente comparaison reste cependant grossière et doit être prise avec précaution. Il est d'une part difficile de comparer les données enregistrées lors d'une seule campagne de terrain printanière avec l'effort considérable de Jean Verneaux dans sa récolte de matériel qui dura 5 ans de 1966-70. D'autre part, la disparition certaine d'une espèce est toujours plus difficile à documenter que sa présence !

Taxons / Stations	Espaces "Listes rouges"									
	Cbe des Enfers_DOU05	Cbe Girard_DOU04	Bied du Loole_DOU02	Rançonnière_UE_NE2408	Rançonnière_Pargots_NE2406	Saut du Doubs_NE2405	Doubs_Les Gravieres_NEW1	Doubs_La Rasse_NE2404	Ronde_STEP_IBCH_DOU01	Doubs_Refrain_TCC_NE2401
Gastropoda										
<i>Acroloxus lacustris</i>					2	1	1			
<i>Ancylus fluviatilis</i>	10	3				1	23			
<i>Bithynia tentaculata</i>					29		4		1	
<i>Gyraulus albus</i>						1	1			
<i>Haitia acuta</i>						3		173		
<i>Radix ovata</i>	3	75	13			12	8			12
<i>Valvata cristata</i>					14					2
Ephemeroptera [E]										
<i>Baetis alpinus</i>					1					
<i>Baetis buceratus</i>	VU				2					
<i>Baetis lutheri</i>						12	11			18
<i>Baetis rhodani</i>		26	676	674	91	182	340			265
<i>Caenis horaria</i>					3					
<i>Caenis rivulorum</i>	EN					30	10			580
<i>Centroptilum luteolum</i>						7				
<i>Cleon dipterum</i>										3
<i>Ecdyonurus venosus</i>						1				
<i>Ephemera danica</i>										4
<i>Habroblebia lauta</i>			1						1	
<i>Rhithrogena picteti</i>		1								
<i>Rhithrogena semicolorata</i>						1				
<i>Seratella ignita</i>										75
<i>Torleya major</i>	VU					15	2			82
Plecoptera [P]										
<i>Leuctra sp.</i>		95	27	1			1			
<i>Nemoura sp.</i>		16	23	4			2			
<i>Siphonoperla torrentium</i>							10	2		11
Trichoptera [T]										
<i>Allogamus auricollis</i>										4
<i>Anabolia nervosa</i>						5				3
<i>Chaetopterygini/Stenophylacini</i>				3						
<i>Chaetopteryx villosa</i>			4							
<i>Cheumatopsyche lepida</i>										2
<i>Drusus annulatus</i>		5	15							
<i>Halesus radiatus</i>						10				
<i>Hydropsyche instabilis</i>						1		1		
<i>Hydropsyche pellucida</i>							10			
<i>Hydropsyche siltalai</i>						100	100			100
<i>Hydroptilila sp.</i>						1				18
<i>Lepidostoma hirtum</i>						2	24			51
<i>Limnephilus lunatus</i>						1				
<i>Melampophylax mucoreus</i>						10	161			7
<i>Odontocerum albicorne</i>										1
<i>Plectrocnemia conspersa</i>		1	13			2	1			8
<i>Polycentropus sp.</i>										
<i>Potamophylax cingulatus</i>			2					1		
<i>Psychomyia pusilla</i>										1
<i>Rhyacophila dorsalis</i>						4				
<i>Rhyacophila s.str.</i>		29	31			4	8			13
<i>Rhyacophila tristis</i>										2
<i>Sericostoma sp.</i>					2	14	7			42
<i>Silo nigricornis</i>							1			
Richesse taxonomique EPT	7	9	4	-	-	5	22	14	2	21
Espèces listes rouges	-	-	-	-	-	1	2	2	-	2

Tableau 28 Listes rouges (Lubini et al., année 2012), résultats détaillés par station de cours d'eau. Abondances exprimées en nombre d'individus déterminables pour 0.5 m².

REPUBLIQUE ET CANTON DE NEUCHÂTEL
Service de l'énergie et de l'environnement

Bassin du Doubs Neuchâtelois
Diagnostic pluridisciplinaire des eaux de surface

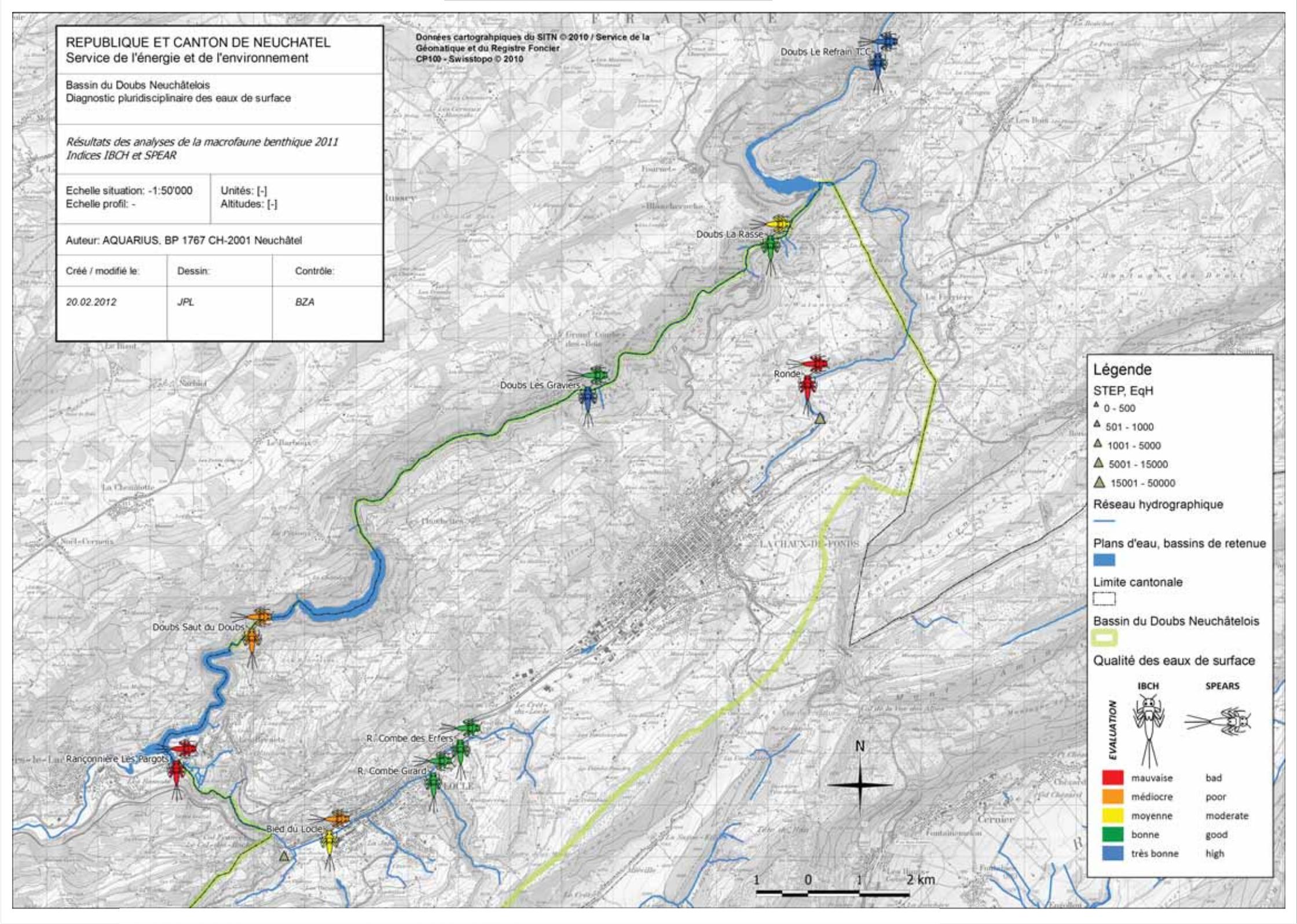
Résultats des analyses de la macrofaune benthique 2011
Indices IBCH et SPEAR

Echelle situation: -1:50'000 Unités: [-]
Echelle profil: - Altitudes: [-]

Auteur: AQUARIUS. BP 1767 CH-2001 Neuchâtel

Créé / modifié le:	Dessin:	Contrôle:
20.02.2012	JPL	BZA

Données cartographiques du SITN © 2010 / Service de la
Géomatique et du Registre Foncier
CP100 - Swisstopo © 2010



Légende

STEP, EqH

- ▲ 0 - 500
- ▲ 501 - 1000
- ▲ 1001 - 5000
- ▲ 5001 - 15000
- ▲ 15001 - 50000

Réseau hydrographique

- Plans d'eau, bassins de retenue
- Limite cantonale
- Bassin du Doubs Neuchâtelois

Qualité des eaux de surface

EVALUATION	IBCH	SPEARS
		mauvaise
	médiocre	poor
	moyenne	moderate
	bonne	good
	très bonne	high

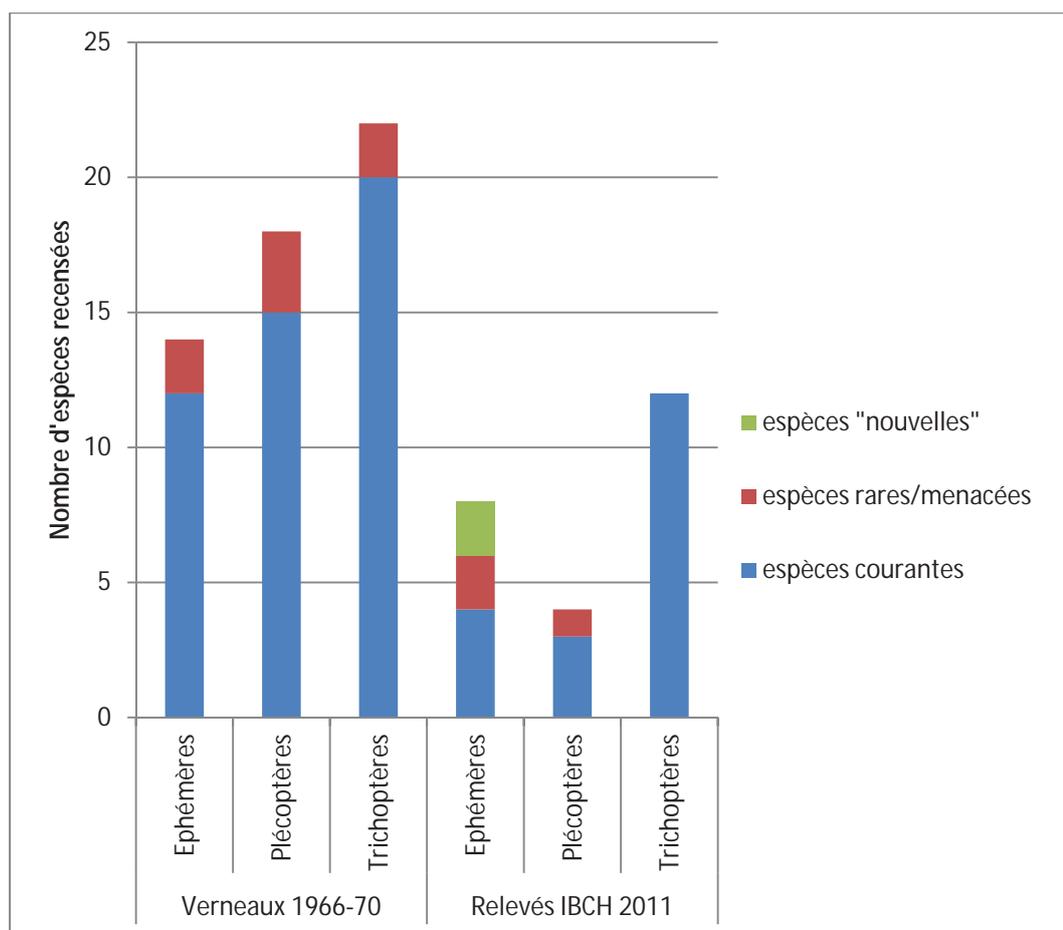


Figure 59 Comparaison des relevés IBCH 2011 avec les données de Verneaux 1966-70 au lieu-dit « Les Gravier ».

8.2.4.4 Observations ponctuelles liées aux éclusées

Les campagnes de terrain sur le Doubs ont permis l'observation des effets des éclusées sur différents tronçons du cours d'eau. Nous décrivons ci-dessous l'évènement survenu le 17.04.2011 vers la mi-journée au lieu-dit « Les Gravier » à l'aval de l'usine hydroélectrique du Châtelot. Alors que nous définissions le plan d'échantillonnage du tronçon selon la grille de protocole-IBCH, le débit a brusquement diminué. La diminution fut progressive mais rapide. En l'espace de 1,5 heure la largeur du lit mouillé a été réduite de moitié à la hauteur de l'entrée d'un bras mort. Ce dernier s'est lentement vidé, à la faveur de la baisse du niveau de l'eau, entraînant de nombreux alevins et des larves d'invertébrés dans le lit principal du cours d'eau. Dans les surfaces de marnage, les sédiments à granulométrie grossière (galets) présentaient un « encroutement » caractéristique. Pour le macrozoobenthos, ces surfaces possèdent un potentiel de colonisation faible à nulle. Plusieurs pontes de grenouille rousse se retrouvèrent exondées après la baisse du niveau d'eau.

En raison du profil très étalé du cours d'eau au lieu-dit « Les Gravier » les effets du marnage sur l'écosystème y sont particulièrement spectaculaires (worst case). Quelques photographies sont utilisées ci-après pour illustrer ce phénomène.



Figure 60 Photos comparatives du Doubs au lieu-dit « Les Gravier ». Photos prises le 17.04.2011, à 12h17 à gauche et à 13h39 à droite.



Figure 61 Doubs, Les Gravier, 17.04.2011, Ponte de grenouille rousse mise à sec (gauche) et « encroûtement » caractéristique des substrats dans la zone de marnage à droite.

8.2.5 Conclusion

Les analyses effectuées à partir des échantillonnages du macrozoobenthos ont permis de mettre en évidence les situations contrastées suivantes :

- > Points de mesure sur le **Doubs « aval Châtelot » (IBCH : Les Gravieres 19, La Rasse 16 & Le Refrain 19 (sur 20))**: Les valeurs obtenues indiquent une bonne qualité biologique du cours d'eau et ne permettent pas de mettre en évidence l'impact des éclusées sur la macrofaune benthique. La cause de ces valeurs élevées réside dans la grande diversité taxonomique qu'héberge le Doubs. Celle-ci tire la note vers le haut. La liste des espèces EPT qui s'est apparemment fortement réduite depuis 40 ans donne des informations plus précises quant à l'impact du marnage sur les espèces sensibles. Les surfaces soumises au marnage présentent une faible colonisation par le macrozoobenthos, il en résulte trivialement une baisse effective de la biomasse globale.
- > Point de mesure sur le **« Saut du Doubs » (IBCH 7/20)** : les résultats confirment les observations faites sur le terrain d'un milieu pollué. Le débit « naturel » du cours d'eau reporte essentiellement le dysfonctionnement observé sur une qualité de l'eau insuffisante. Les données de la physico-chimie et du périphyton corroborent ce constat. La station se caractérise par une extrême pauvreté en espèce sensibles EPT. L'indice SPEAR (classé « poor ») semble indiquer une atteinte de ce tronçon par les micropolluants.
- > Points de mesure sur les affluents du Doubs, **La Ronde (IBCH 4/7), La Rançonnière (IBCH 0 & 3/20) et le Bied du Locle (IBCH 10/20)** : tous ces cours d'eau présentent un état dégradé dû aux rejets urbains, industriels et dans une moindre mesure agricoles. La Ronde est constituée à 100% des eaux usées de la Ville de La Chaux de Fonds. La présence de substances tensioactives (néfaste aux invertébrés benthiques) est mise en évidence par un SPEARorganic-Index particulièrement bas. La Rançonnière reçoit les rejets des STEP du Locle et des Brenets qui fonctionnent mal (cf. chapitre 7.1 Généralités). Ce cours d'eau est particulièrement dégradé. Ces observations confirment les diagnostics posés à partir des communautés de diatomées sur ces deux cours d'eau (Straub 2003, 2005). Enfin, Le Bied du Locle mériterait une analyse détaillée des rejets souterrains qui affectent apparemment sa qualité le long de son parcours sous la ville. Une comparaison de la qualité biologique à la sortie du voûtage avec celle des affluents à l'amont de la ville semble indiquer l'arrivée d'eaux douteuses sur ce tronçon.
- > Point de référence sur les ruisseaux de la **Combe Girard et de la Combe des Enfers (IBCH 13/20), deux affluents du Bied du Locle**: les valeurs obtenues indiquent un fonctionnement et une qualité biologique normale pour ce type de petits cours d'eau. Les indices SPEAR y sont bons.

8.3 Faune piscicole

8.3.1 Généralités

8.3.1.1 Faune piscicole actuelle du Doubs, y compris les retenues

Nom français/local	Dénomination scientifique	Présence actuelle sur territoire neuchâtelois	Statut
Anguillidae:			
Anguille	<i>Anguilla anguilla</i>	Oui	3
Coregonidae			
Coregones	<i>Coregonus sp.</i>	Oui	4, E
Cottidae:			
Chabot	<i>Cottus gobio</i>	Oui	4
Cyprinidae:			
Brème franche	<i>Abramis brama</i>	Oui	NM
Brème bordelière	<i>Blicca bjoerkna</i>	Oui	NM
Spirilin	<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Oui	3, E
Ablette	<i>Alburnus alburnus</i>	Oui	NM
Barbeau	<i>Barbus barbus</i>		4
Sofie	<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Non	1, E
Nase	<i>Chondrostoma nasus</i>	Non	1, E
Carpe	<i>Cyprinus carpio</i>	Oui	3
Goujon	<i>Gobio gobio</i>	Oui	NM
Chevaine	<i>Squalius cephalus</i>	Oui	NM
Vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Oui	NM
Blageon	<i>Telestes souffia</i>	Oui	3, E
Vairon	<i>Phoxinus phoxinus</i>	Oui	NM
Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	Oui	NM
Rotengle	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Oui	NM
Tanche	<i>Tinca tinca</i>	Oui	NM
Esocidae:			
Brochet	<i>Esox lucius</i>	Oui	NM
Noemacheilidae:			
Loche franche	<i>Barbatula barbatula</i>	Oui	NM
Percidae:			
Perche	<i>Perca fluviatilis</i>	Oui	NM
Grémille	<i>Gymnocephalus cernua</i>	Oui	NM
Sandre	<i>Zander lucioperca</i>	Oui	Néozone
Apron, Roi du Doubs	<i>Zingel asper</i>	Non	1, S
Petromyzontidae:			
Petite lamproie	<i>Lampetra planeri</i>	Oui	2, E
Siluridae:			
Silure glâne	<i>Silurus glanis</i>	Oui	4, E
Noemacheilidae:			
Loche franche	<i>Barbatula barbatula</i>	Oui	NM
Salmonidae:			
Truite de rivière	<i>Salmo trutta fario</i>	Oui	4
Truite zébrée	<i>Salmo trutta rhodanensis</i>	Oui	ND
Ombre de rivière	<i>Thymallus thymallus</i>	Oui	3, E
Saumon de fontaine	<i>Salvelinus fontinalis</i>	Oui	Néozone
Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Oui	Néozone

Statut : Statut de l'espèce: 0 = éteinte, 1 = menacée d'extinction, 2 = fortement menacée, 3 = menacée, 4 = potentiellement menacée, NM = non menacée

E = protégée à l'échelle européenne selon la Convention de Berne, S = strictement protégée à l'échelle européenne selon la Convention de Berne. ND = non déterminé.

Tableau 29 Liste taxonomique des espèces de poissons présentes dans le Doubs lentique et lotique selon la base de données actualisée des poissons et cyclostomes de Suisse. Les noms scientifiques correspondent à la nouvelle nomenclature proposée pour la mise à jour de l'Ordonnance relative à la loi fédérale sur la pêche (OLF) du 24 novembre 1993 (Etat le 1er juillet 2009).

Certains de ces taxons, tel le saumon de fontaine, n'ont fait l'objet que d'une observation certifiée alors que d'autres sont abondants et régulièrement recensés. La majorité des poissons inventoriés sont indigènes, une partie sont des néozones qui ont été introduits dans le bassin du Doubs, très probablement à des fins halieutiques.

8.3.1.2 *Importance du Doubs comme habitat piscicole*

De manière générale, le Doubs représente un habitat remarquable d'intérêt national et européen pour la faune piscicole. Il abrite en effet un spectre d'espèces très riche qui ne se rencontre plus que dans quelques cours d'eau. Les parties suisse et franco-suisse du Doubs revêtent une importance particulière pour plusieurs poissons. Il s'agit de :

- > **L'ombre de rivière**, espèce menacée et protégée au niveau européen, possède plusieurs populations d'intérêt national³² dans la partie du Doubs franco-suisse. Bien que son aire de distribution s'arrête ci-dessous à l'amont au barrage du Refrain, l'ombre est bien représenté sur le Doubs neuchâtelois.

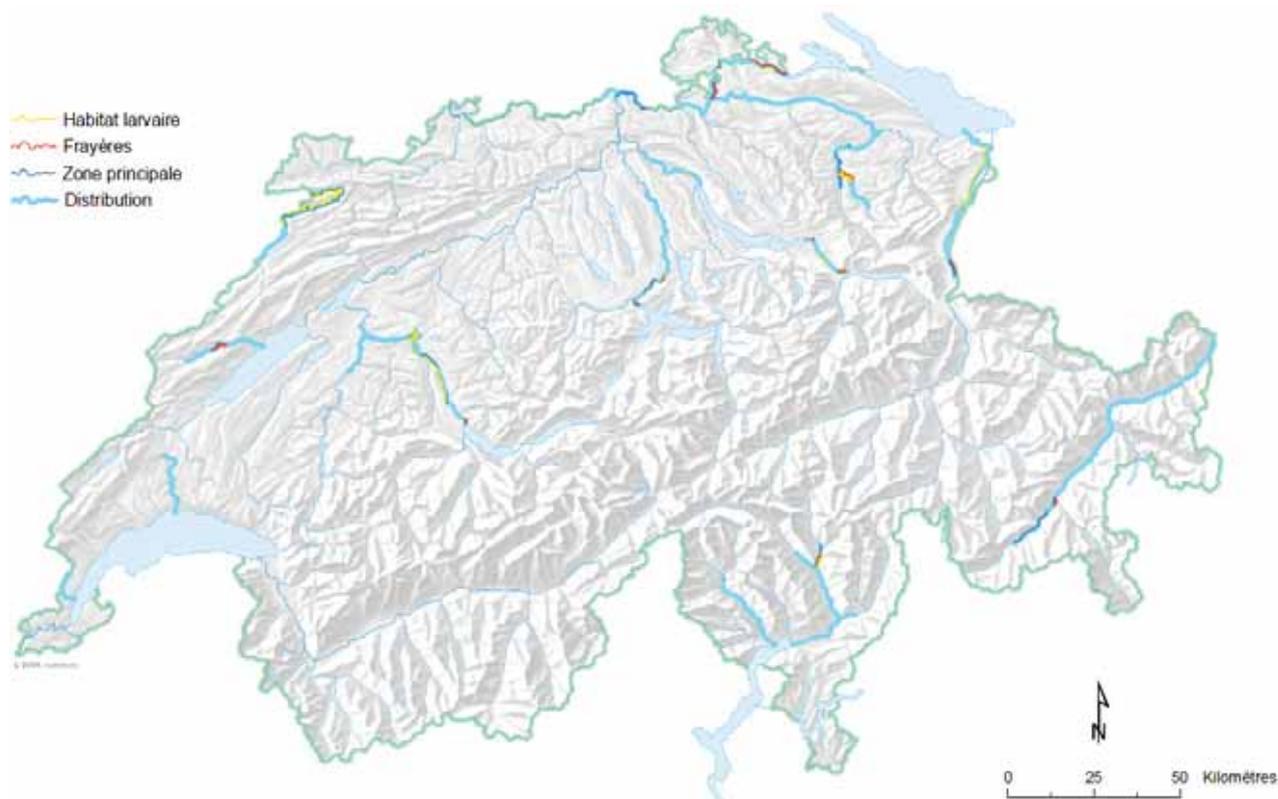


Figure 62 *Populations d'ombres d'importance nationale: Distribution, zones principales, frayères, habitats larvaires. OFEV 2006.*

³² Kirchhofer, A., Breitenstein, M. & Guthruf, J. 2002: Populations d'ombres d'importance nationale. OFEFP, Berne – Informations concernant la pêche n° 70.

- > **La sofie**, menacée d'extinction et protégée au niveau européen, est présente en suisse uniquement dans la partie jurassienne du Doubs³³. Son aire de distribution de s'étend pas au Doubs neuchâtelois.
- > **L'apron**, menacé d'extinction et strictement protégé au niveau européen, est présent aujourd'hui en suisse uniquement dans la partie jurassienne du Doubs³⁴. Le site d'observation le plus en amont de cette espèce se situait à Goumois et remonte à 1930. Il n'y a plus été observé depuis plusieurs décennies. Il est actuellement considéré comme absent du bassin neuchâtelois.
- > **La truite zébrée**, *Salmo rhodanensis* selon Kottelat et Freyhof (2007)³⁵ mais dont la taxinomie n'est pas encore clairement arrêtée en Suisse (et par conséquent le statut de menace également), est présente en suisse uniquement dans le Doubs³⁶.

Précisons également le rôle important que joue le Doubs pour diverses autres espèces peu communes et menacées telles que le blageon ou la petite lamproie.

8.3.1.3 *Activités halieutiques*

En sus des espèces ci-après pour lesquelles des tailles minimales de capture sont définies, plusieurs poissons suscitent un intérêt pour la pêche sportive. Citons notamment le silure qui depuis quelques années est abondamment pêché dans le lac des Brenets dans lequel il a été introduit et au sein duquel les effectifs prolifèrent depuis environ une décennie.

- > Truite: 28 cm;
- > Ombre: 32 cm;
- > Brochet: 50 cm; pas de mesure en 1ère catégorie
- > Sandre: 40 cm;
- > Ecrevisse: 11 cm.

La pratique de la pêche sportive sur le Doubs franco-neuchâtelois est soumise à permis ainsi notamment qu'à :

- > L'Arrêté cantonal concernant la pêche dans les eaux de l'Etat en 2011, à l'exclusion du lac de Neuchâtel.
- > L'Accord entre le Conseil fédéral suisse et le Gouvernement de la République française concernant l'exercice de la pêche et la protection des milieux aquatiques dans la partie du Doubs formant frontière entre les deux Etats conclu le 29 juillet 1991 (entrée en vigueur par échange de notes le 1er juillet 1993).

³³ MAIER, K.-J., ZEH, M., ZBINDEN S. & HEFTI, D. (1995). Distribution et reproduction des espèces du genre *Chondrostoma* en Suisse. Informations concernant la pêche No 53, OFEFP, 62 p.

³⁴ AQUARIUS. (1999). Concept de protection de l'Apron (Zingel asper) : recensement des effectifs dans le Doubs franco-suisse et suisse. Informations concernant la pêche No 64, OFEFP, 58 p.

³⁵ Kottelat, M. and J. Freyhof 2007 Handbook of European freshwater fishes. Publications Kottelat, Cornol, Switzerland. 646 p.

³⁶ MAIER, K.-J., ZEH, M., ZBINDEN S. & HEFTI, D. (1995). Distribution et reproduction des espèces du genre *Chondrostoma* en Suisse. Informations concernant la pêche No 53, OFEFP, 62 p.

Les tronçons pouvant être pêchés sont subdivisés en secteurs de 1^{ère} catégorie (eaux courantes) et de 2^{ème} catégorie (eaux dormantes). Les secteurs suivants sont notamment interdit à la pêche :

- > Région de la Combe-Girard;
- > dans le canal de fuite de l'usine du Châtelot, de la sortie de l'usine jusqu'au Doubs;
- > dans l'étang de la Ronde à Biaufond.

8.3.1.4 Repeuplements

De manière générale, les objectifs recherchés par le repeuplement sont les suivants :

- > Compléter les juvéniles manquants dans des cours d'eau où une carence du succès de la reproduction naturelle des poissons est constatée ou supposée ;
- > soutenir les peuplements piscicoles en place afin de permettre d'accroître le rendement de la pêche, notamment lorsque la pression de pêche est élevée ;
- > introduire une espèce nouvelle ou réintroduire une espèce disparue.

L'introduction de salmonidés dans le Doubs est pratiquée de longue date. Les espèces et les souches utilisées ont toutefois été très variables dans le temps et ce n'est que récemment que les questionnements liés à la pertinence du rempoissonnement et à la qualité génétique (origine) des poissons utilisés sont apparus.

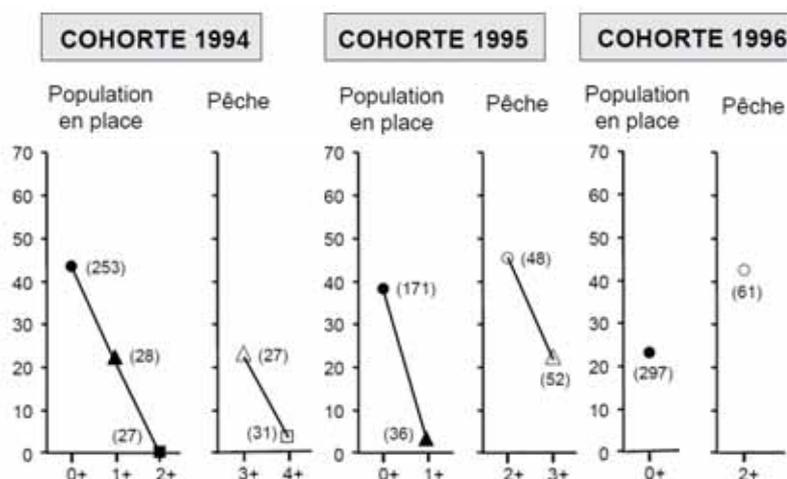


Figure 63 Evaluation de la contribution (en %) de l'alevinage pour le secteur situé sur le Doubs franco-suisse entre le barrage de la Goule et la boucle jurassienne, cohorte par cohorte. (n) : taille de l'échantillon. D'après Champigneulle et al., 2002³⁷.

Depuis 1998, la Commission mixte pour la pêche dans le Doubs frontière a décidé de n'y pratiquer le repeuplement qu'avec des poissons issus de géniteurs de truites de la souche du

37 Champigneulle A., Degiorgi F., Raymond J.C., Cachera S., 2002 : Dynamique temporelle de la contribution du repeuplement en stades précoces de truite (*Salmo trutta* L.) dans la population en place et dans la pêche sur le Doubs franco-suisse. Bull. Fr. Pêche Piscic. 365/366 : p. 471-485.

Doubs, prélevés dans le cours d'eau. Actuellement, le rempoissonnement s'effectue exclusivement avec des alevins 0+.

Les administrations et associations françaises et suisses concernées par la pêche et la protection de la faune aquatique ont élaboré, après plusieurs années de discussions, une charte intitulée «préservons la truite du Doubs». Ce document (cf. annexe AQ-2) a été ratifié en 2006 par la majorité des partenaires. L'objectif de cette démarche est de préserver la truite zébrée du Doubs en développant une gestion halieutique respectant les principes du développement durable.

8.3.2 Suivis et données existantes

8.3.2.1 *Les poissons comme indicateurs*

Se situant au sommet de la chaîne alimentaire aquatique, les poissons présentent de manière générale de bonnes caractéristiques d'indicateurs, en particulier pour les raisons suivantes (voir également KARR ET AL. 1986)³⁸:

- Compte tenu de la complexité et de la spécificité de leurs exigences habitationnelles, les poissons sont de bons indicateurs de l'état hydrologique et morphologique des eaux dans lesquelles ils évoluent.
- Les espèces appartenant à une ichtyocénose sont représentatives de plusieurs niveaux trophiques (espèces insectivores, planctophages, omnivores, piscivores et herbivores).
- De par leur comportement migratoire, les poissons ne sont pas seulement indicateurs d'habitats spécifiques mais aussi de leur connectivité à différents niveaux spatio-temporels.
- Les poissons présentent une durée de vie relativement longue, ce qui permet d'intégrer une dimension temporelle dans l'évaluation de l'état des cours d'eau.
- Les espèces de poissons sont relativement faciles à déterminer.
- La distribution historique des poissons est bien documentée et peut servir de référence pour la situation actuelle.
- On dispose de bonnes connaissances sur l'écologie des poissons.

La faune piscicole des cours d'eau se compose d'un certain nombre d'espèces en fonction des conditions biotiques et abiotiques du milieu. Suivant leurs caractéristiques, les cours d'eau abritent des espèces typiques que l'on doit donc s'attendre rencontrer. Par la mise en commun de ces biocénoses idéales et de la liste des espèces de poissons et de leurs aires de répartition respectives, on obtient une bonne base d'évaluation de la composition.

La structure de la population d'une espèce qui indique l'abondance des différentes classes d'âge, la densité des poissons ainsi que la présence de poissons juvéniles (0+) servent d'indicateurs du succès de la reproduction naturelle.

³⁸ KARR, J.R., K.D. FAUSCH, P.L. ANGERMEIER, P.R. YANT, AND I.J. SCHLOSSER. 1986. Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale. Special publications 5. Illinois Natural History Survey.

8.3.2.2 *Type de suivis*

L'intérêt du suivi des populations piscicoles poursuit 3 principaux objectifs, notamment :

- > L'optimisation de la gestion des espèces présentant un intérêt halieutique (limite des nombres et tailles de captures, nécessité de repeuplement, etc.).
- > Le monitoring de la biodiversité de la faune piscicole (espèces présentes, apparitions, disparitions, répartitions etc.).
- > Le suivi particulier d'espèces rares, menacées ou/et emblématiques (augmentation ou diminution des populations, mesures de protection etc.).

Les méthodes de suivi communément pratiquées sur le Doubs neuchâtelois sont les suivantes :

- > **Statistiques de pêche** : Chaque pêcheur tient un carnet de pêche dans lequel il mentionne les captures réalisées et qu'il retourne à la section faune du SFFN. Plus le nombre de pêcheurs est significatif et bien distribué, plus cette méthode semi-quantitative permet d'avoir une indication précise de la distribution, de l'abondance et de la dynamique des espèces d'intérêt halieutique. Elle n'apporte toutefois pas ou très peu d'informations sur les autres espèces.
- > **Pêches à l'électricité** : Seule véritable méthode quantitative employée. Elle consiste en la capture des poissons par électro-narcose. La réponse est cependant différente selon les espèces et la taille des poissons. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est difficile à mettre en œuvre sur le Doubs en raison du grand nombre d'opérateurs nécessaires ainsi que de la profondeur moyenne souvent trop élevée de la rivière.

Des sondages ou recensements de frayères ont été ponctuellement réalisés sur le Doubs franco-neuchâtelois, toutefois aucun suivi exhaustif réalisé à partir de pêches à l'électricité n'a été pratiqué au cours des deux dernières décennies par le canton de Neuchâtel. Désireux de combler cette lacune, le SFFN a organisé et effectué une première campagne de pêche d'envergure courant 2011.

Côté français, Verneaux a réalisé en 1970 les premières pêches de recensement à l'électricité sur le Doubs franco-suisse dans le cadre de sa thèse³⁹. Depuis cette époque, diverses stations ont été suivies entre 1985 et 1986⁴⁰, puis entre 1996 et 2000⁴¹.

³⁹ VERNEAUX J., 1973. Cours d'eau de Franche-Comté (Massif du Jura). Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs. Essai de biotypologie. Thèse de doctorat, Université de Besançon, 257 p.

⁴⁰ SRAE Franche-Comté, 1986. Aménagement hydroélectrique du Doubs franco-helvétique, éléments de diagnose. 46 p.

⁴¹ CSP DR5, 2000. Étude piscicole de la retenue du Châtelot, 31 p.

DEGIORGI F., CHAMPIGNEULLE A., 2000. Diagnose piscicole et mesure de l'efficacité des alevinages en truites sur le Doubs Franco-helvétique. Conseil supérieur de la pêche et Institut national de la recherche agronomique de Thonon-les-Bains, 119 p.

En 2004, sur la base des travaux menés dans le cadre de la Commission Mixte Franco-suisse, ainsi que du programme d'amélioration des écosystèmes du Doubs franco-suisse formalisé dans l'Accord-cadre signé le 30 juin 2003, la DIREN Franche-Comté⁴² a entrepris de poursuivre des pêches de suivi. Celles-ci ont pour but notamment de suivre les mesures d'amélioration entreprises dans l'exploitation hydroélectrique du Doubs franco-suisse. C'est dans ce dernier contexte qu'une pêche à l'électricité a été reconduite en 2011 par l'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques).

8.3.3 Méthodes

8.3.3.1 *Méthode de pêche*

La méthodologie de pêche pratiquée de manière générale et affinée au cours des années répond à un protocole exigeant et précis. Ce dernier est présenté à l'annexe AQ-3. Un protocole simplifié a été utilisé pour la Suisse.

Sommairement, suivant ce principe, les inventaires par pêches à l'électricité sont réalisés par deux ou trois passages successifs avec retrait des poissons entre les passages. Chaque secteur de pêche est isolé par des filets en amont et parfois également en aval de la station et, selon la largeur du cours d'eau, de 6 à 10 électrodes de front sont généralement mises en œuvre.

Dans le cadre des pêches suisses 2011, des prélèvements d'écaillés ont été effectués sur des truites afin de réaliser des scalimétries et rétro-calculations (rapport entre l'âge et la taille du poisson).

8.3.3.2 *Interprétation des résultats*

La régression des captures à chaque passage permet d'estimer des densités numériques et pondérales par unité de surface ou par linéaire de cours d'eau. Les méthodes de De Lury (1947)⁴³ et de Carle & Strube (1978)⁴⁴ sont utilisées.

Les abondances et biomasses obtenues sont notamment comparées en France à un référentiel piscicole idéal basé sur le modèle biotypologique de Vernaux (op. cit.). Ce modèle part du postulat qu'en l'absence d'altération physico-chimique, l'abondance de chaque espèce de poisson varie pour atteindre des valeurs maximales optimales au niveau de leur préférendum écologique. Ces valeurs optimales sont déterminées de façon statistique sur une série de sites non pollués, puis transformées en classe d'abondance intrinsèque à chaque espèce⁴⁵.

⁴² DIREN – FC, 2004 : Évaluation de la qualité des écosystèmes du Doubs franco-suisse - Étude de la qualité piscicole du Doubs franco-helvétique. Définition d'un état initial. 37 p.

⁴³ De Lury D. B. (1947) : On the estimation of biological populations. *Biometrics* 34(4) 145-167.

⁴⁴ Carle F. L., Strub M. R. (1978): A new method for estimating population size from removal data. *Biometrics*, 34, 621-630.

⁴⁵ Degiogi F., Raymond J.C., 2003. Guide technique : utilisation de l'ichtyofaune pour la détermination de la qualité globale des écosystèmes d'eau courante, 197 p.

8.3.4 Résultats 2011

8.3.4.1 Résultats des pêches françaises

Trois stations ont été pêchées et ont fait l'objet d'un rapport⁴⁶. Il s'agit :

- > Station à l'amont du tronçon court-circuité de l'installation hydroélectrique du Châtelot (Chez Némorin).
- > Station intermédiaire située à l'aval de la restitution du Refrain (Le Câble).
- > Station aval, située après le barrage du Thesseuret (Les Seignottes).

Seuls les résultats de la station « Chez Némorin » qui se trouve sur le bassin du Doubs neuchâtelois sont reportés dans le présent chapitre.

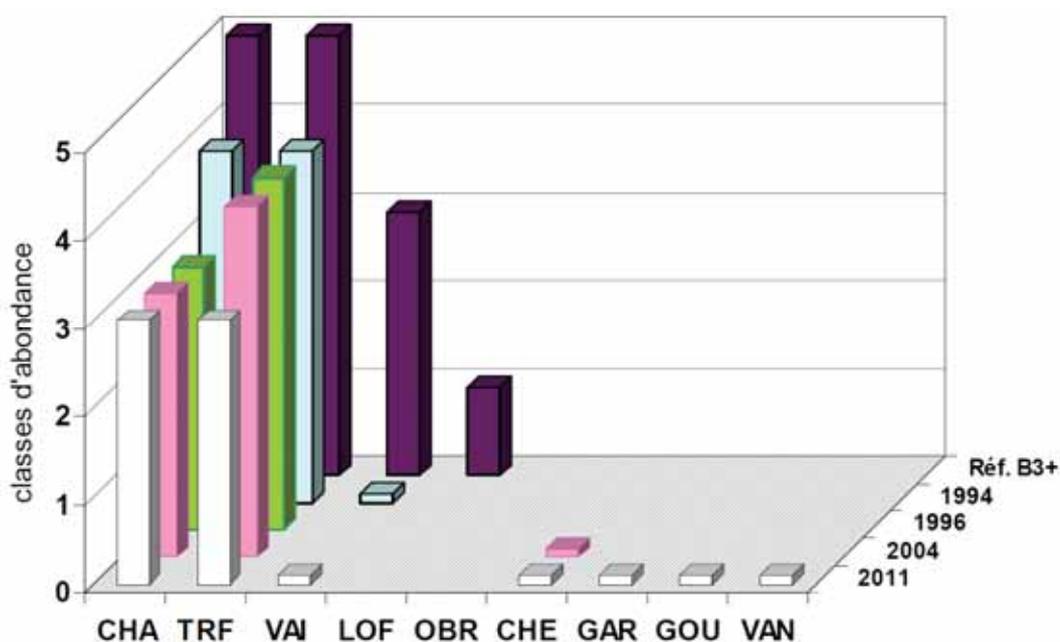


Figure 64 Structure du peuplement piscicole observé au niveau de la station du tronçon court-circuité du Châtelot (ONEMA, 2012). CHA : Chabot / TRF : Truite fario / VAI : Vairon / LOF : Loche franche / OBR : Ombre / CHE : Chevaine / GAR : Gardon / GOU : Goujon / VAN : Vandoise.

Globalement, les résultats qualitatifs soulignent la présence des espèces caractéristiques de ce type de milieu mais aussi la persistance d'espèces caractéristiques de types écologiques inférieurs ou inféodés aux zones lenticques tel que le gardon par exemple. La présence de ces espèces s'explique d'une part par l'existence des retenues liées aux ouvrages hydroélectriques et d'autre part par une possible remontée de certaines espèces.

En terme de richesse spécifique, 4 espèces supplémentaires ont été échantillonnées (chevaine, gardon, goujon, vandoise). Ces résultats sont toutefois à nuancer au vu des très faibles abondances de ces dernières (moins de 7 individus échantillonnés pour chacune de ces espèces).

⁴⁶ Borderelle A.-L., 2012 : Etude de la qualité piscicole sur trois stations du Doubs franco-helvétique. ONEMA.

Le peuplement observé en 2011 sur cette station présente des signes de dégradation. Par rapport au référentiel typologique, on note en effet l'absence de la loche franche et la quasi absence du vairon. Par ailleurs, comparativement au référentiel typologique mais également par rapport aux années antérieures, l'abondance de truite a sensiblement diminué. Concernant le chabot, la donnée présentée est également à nuancer en raison de l'efficacité de pêche sur cette espèce. Aussi, malgré un rehaussement des débits au niveau du tronçon court-circuité du Châtelot, des déséquilibres apparaissent toujours présents.

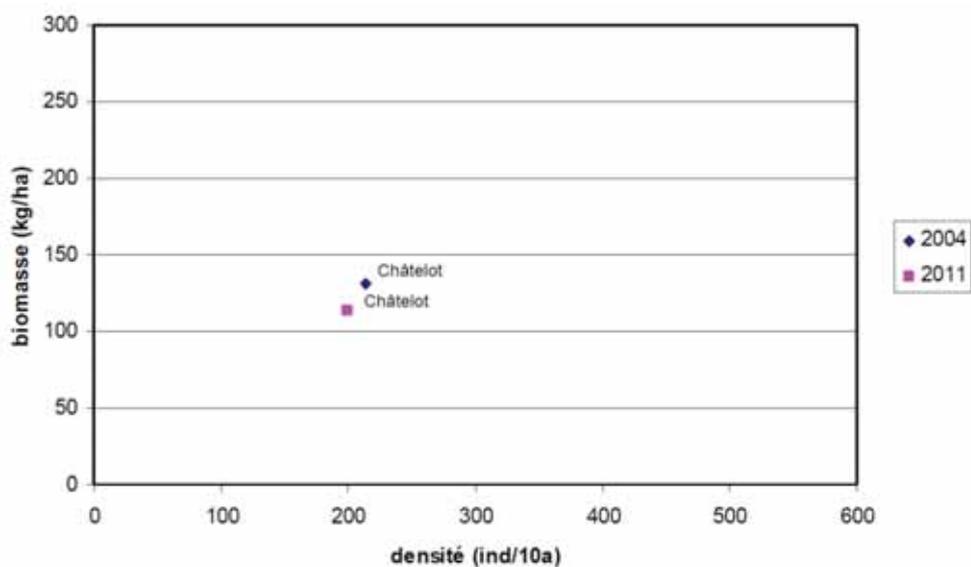


Figure 65 Densités numériques et pondérales de truites sur la station de « Chez Némorin ».

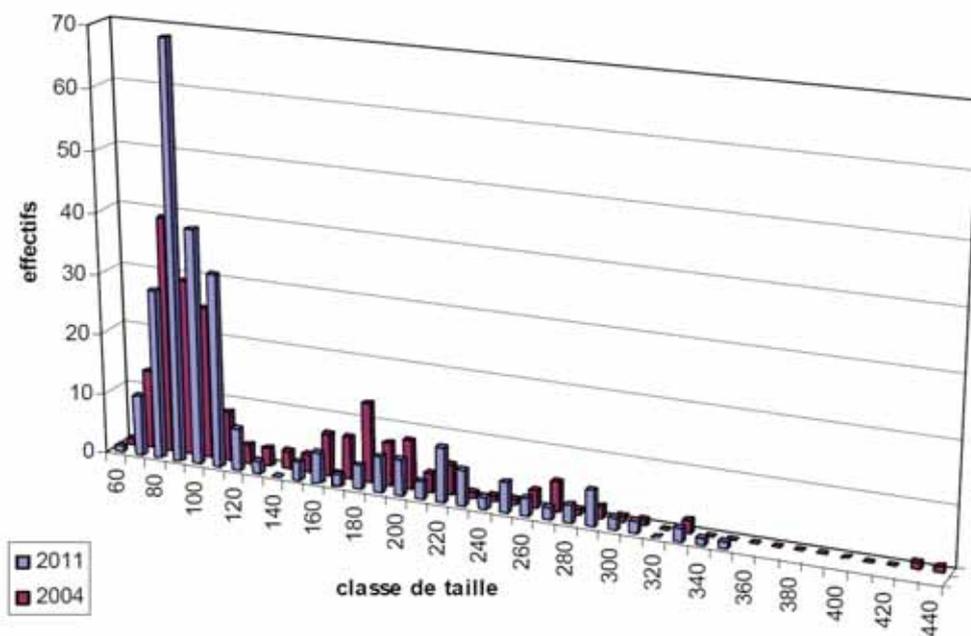


Figure 66 Classes de taille des truites échantillonnées au niveau de la station de « Chez Némorin ».

D'une manière générale les populations de truites des stations du Doubs franco-helvétique ne présentent pas une structure équilibrée en terme de classes d'âge. On note en particulier un déficit de juvéniles (1+) et également d'adultes de plus de 5 ans.

8.3.4.1 Résultats de la pêche suisse

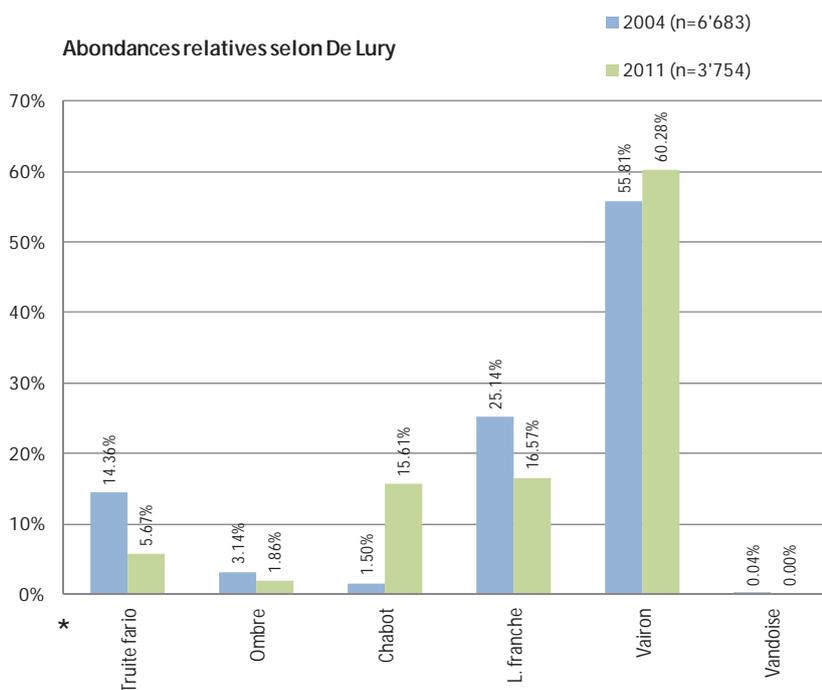
Le rapport complet de la pêche 2011 figure à l'annexe AQ-4. La station pêchée se situe à l'aval du lieu-dit « Les Gravier », approximativement à équidistance entre l'usine de turbinage du Châtelot et le site de « Maison Monsieur ». Les résultats sont présentés synthétiquement ci-après.

	Résultats bruts 2011					Estimé selon De Lury			
	1 ^{er} p.	2 ^{ème} p.	1 ^{er} + 2 ^{ème} passages		2011		2004 ⁴⁷		
	Nb. ind.	Nb. ind.	Nb. ind.	Nb.ind/ha	Biom. kg/ha	Nb.ind/ha	Biom. kg/ha	Nb.ind/ha	Biom. kg/ha
Truite riv.	42	39	81	213	13.9	**	**	960	56.9
Ombre	20	5	25	66	2.4	70	3	210	8.8
Chabot	99	55	154	405	*	586	*	100	1.9
Loche fr.	113	59	172	453	*	622	*	1'680	6.6
Vairon	733	108	841	2'214	*	2'263	*	3'730	18
Vandoise	0	0	0	0	0	0	0	3	0.03

* poissons dénombrés mais non mesurés ni pesés.

** estimation selon De Lury non applicable

Tableau 30 Effectifs & abondances par espèce. Comparaison 2004 - 2011.



* Le pourcentage de truites 2011 est basé sur l'effectif brut

Figure 67 Abondances relatives, comparaison 2004 - 2011.

Compte tenu de l'efficacité insuffisante de la pêche 2011, il est très difficile de comparer les résultats avec les années précédentes.

⁴⁷ Étude de la qualité piscicole du Doubs franco-helvétique. Définition d'un état initial. CSP 2005

On peut toutefois relever qu'à l'exception du chabot, les abondances et biomasses piscicoles relevées dans cette station ont diminué par rapport à 2004. En ce qui concerne les espèces présentant un intérêt halieutique prioritaire, force est de constater que tant l'ombre que la truite voient leurs abondances et biomasses, déjà très faibles en 2004, encore diminuer. Cette situation peut partiellement être attribuée à l'efficacité insuffisante de la pêche 2011, mais est probablement également le reflet d'une dégradation générale des conditions du milieu. Citons en particulier l'augmentation des amplitudes des éclusées depuis 2006, la présence d'organismes pathogènes (*Saprolegnia parasitica*), l'envasement et colmatage local du substrat (lié à l'absence prolongée de crue annuelle plus de 1'300 jours consécutifs), les températures des eaux plus élevées au moment de la reproduction, etc...

Relevons que la pêche d'échantillonnage effectuée en 1994 à proximité de la station « aval Gravier », indiquait déjà un état du peuplement piscicole fortement déficitaire⁴⁸.

Du point de vue de la diversité, le spectre piscicole peut être considéré comme identique en 1994, 2004 et 2011.

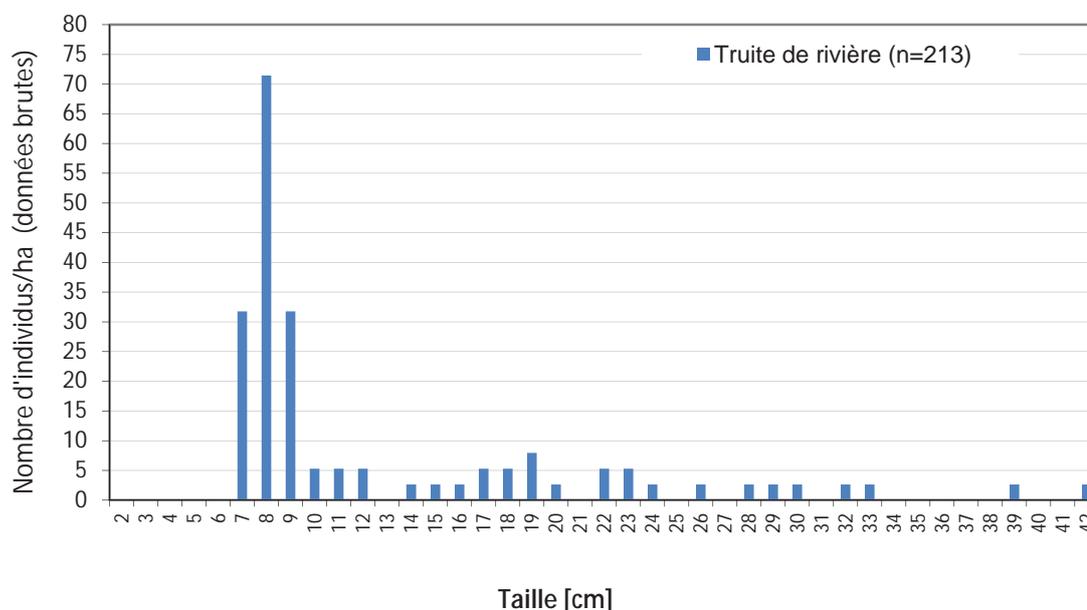


Figure 68 Truites de rivière - effectifs bruts à l'hectare par classes de taille.

Le graphique ci-après compare la croissance de la truite de rivière de la station « aval Gravier » avec celles établies en 2011 dans 3 stations situées sur le Doubs jurassien⁴⁹.

Avec 9 individus théoriques au total, l'échantillon étudié est trop petit pour permettre une comparaison statistique entre les différentes stations échantillonnées. On constate toutefois, à l'instar des résultats d'une étude effectuée en 2002⁵⁰, qu'aucune différence importante de croissance ne peut être mise en évidence d'amont en aval.

⁴⁸ Étude de la qualité piscicole du Doubs franco-helvétique. *Définition d'un état initial*. CSP 2005

⁴⁹ Office de l'environnement du canton du Jura : Pêches d'inventaires 2011 dans le Doubs jurassien. Aquarius.

⁵⁰ Teleos 2002 : Maturité sexuelle et croissance de la truite commune (*Salmo trutta* L.) dans le Canton du Jura. OEPN : 37 p.+ annexes

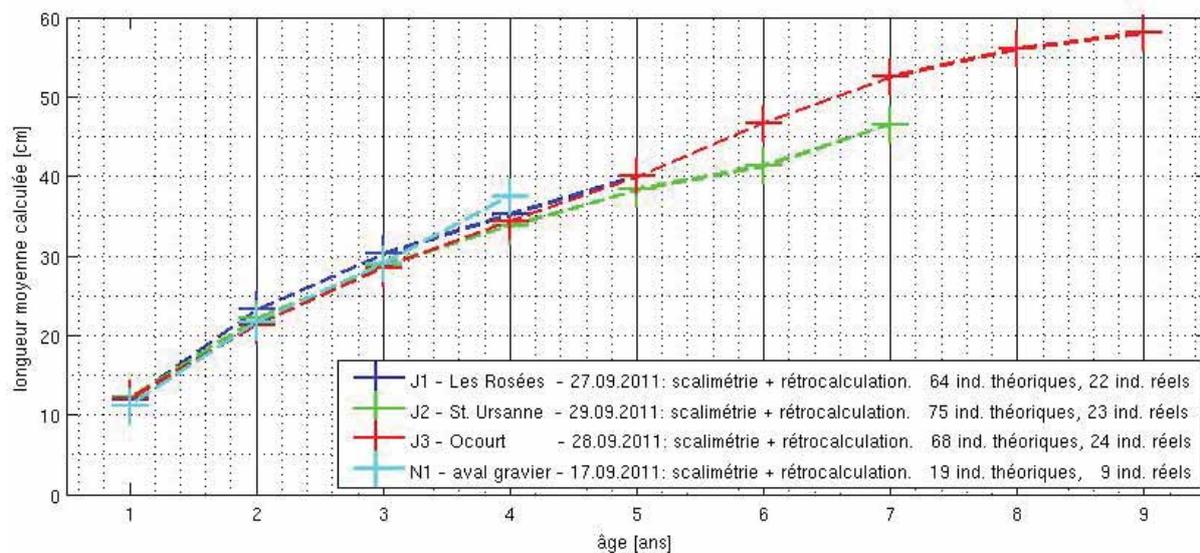


Figure 69 Comparaison des croissances moyennes rétrocalculées.

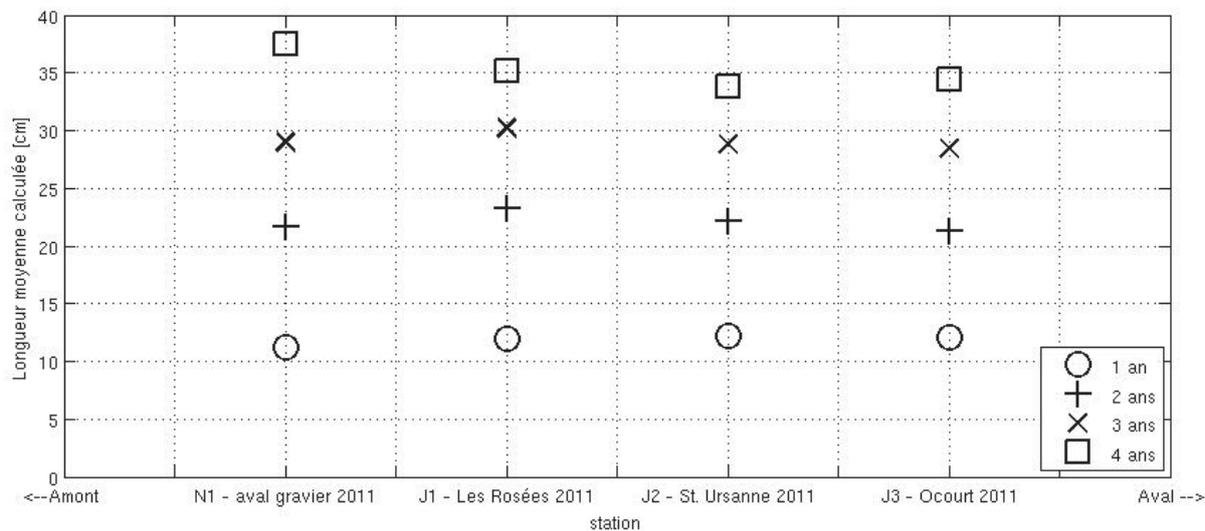


Figure 70 Comparaison, par station d'amont en aval, des croissances moyennes rétrocalculées.

Si l'on compare cette vitesse de croissance avec des données similaires provenant de truites capturées dans le Doubs franco-neuchâtelois en 1994, on constate pour les classes 1 et 2 ans, soit celles où l'échantillon est le « plus grand », une sensible diminution de la vitesse de croissance en 2011. L'étude précitée⁵¹ arrivait à la même conclusion.

Du point de vue de la pratique de la pêche, considérant que selon la littérature l'âge de la maturité sexuelle des truites sur le bassin du Rhône est de 4 ans, on peut considérer que la taille légale de capture limite qui est fixée à 28 cm est insuffisante. Relevons dans ce contexte que le canton du Jura a relevé cette limite à 32 cm depuis 2007.

⁵¹ Teleos 2002 : Maturité sexuelle et croissance de la truite commune (Salmo trutta L.) dans le Canton du Jura. OEPN : 37 p. + annexes

8.3.5 Déclin et mortalité piscicoles

Le déclin des populations piscicoles dans le Doubs a fait l'objet de suivis et d'études détaillées dès les années 90. Une étude approfondie réalisée à l'échelle nationale et principalement ciblée sur la truite de rivière a été finalisée en 2004 dans le cadre du programme FISCHNETZ.

Il ressort des statistiques de pêches ainsi que de ces études (dont notamment Lièvre, 2004⁵²) un déclin avéré dans le Doubs de plusieurs espèces dont notamment la truite et l'apron. L'abondance mesurée des nombreuses espèces est significativement plus faible que leur abondance potentielle.

La baisse des captures de truites fario observée dans le Doubs est due à une réduction de la pression de pêche (effort de pêche, taille minimale de capture), à une modification des mesures de repeuplement (quantités déversées, âge des poissons déversés, dates d'empoissonnement) et à une régression des populations piscicoles. FISCHNETZ attribue cette régression des populations piscicoles (essentiellement la truite) à la mauvaise qualité générale de l'habitat et à la maladie MRP (Maladie rénale proliférative⁵³). La mauvaise qualité de l'habitat est due sur le Doubs jurassien principalement aux perturbations du régime hydrologique ainsi qu'à un manque de connectivité entre les habitats.

Le phénomène de déclin des populations piscicoles semble en majeure partie résulter de l'action combinée de différents facteurs dont les effets peuvent être plus que cumulatifs.

Relevons que les données disponibles ne permettent pas d'amener de résultats précis pour plusieurs espèces telles que le blageon ou la petite lamproie par exemple.

Il est intéressant de constater qu'un grand nombre de changements contribuant à la détérioration du Doubs ne se sont pas uniquement produits au cours des 20 dernières années mais sont le reflet d'évolutions plus anciennes qui agissent depuis longtemps sur cet hydrosystème et dont les effets ne sont apparus que progressivement au niveau des populations piscicoles. On compte au nombre de ces perturbations à long terme les aménagements hydrauliques ainsi que la perte de connectivité longitudinale.

Dans le cadre du programme FISCHNETZ, plusieurs hypothèses de la cause du déclin piscicole ont été étudiées sur le territoire helvétique. Celles qui étaient liées à un déficit précis sont les suivantes :

- > Le déclin de la pêche est le résultat de pathologies particulières entraînant une mort prématurée des poissons.
- > La pollution chimique des eaux est responsable d'une dégradation de l'état de santé des poissons.
- > Le déclin piscicole est dû à une qualité morphologique insuffisante des cours d'eau.

⁵² Lièvre A., Périat G., Koegler J., Voiron Y., Degiorgi F., Decoursière H., Vergon J.P., 2004 : Etude des causes de diminution des populations de poissons dans les cours d'eau jurassiens – Rapport final. Programme Fischnetz.

⁵³ Les truites fario peuvent en effet survivre dans des cours d'eau contaminés par l'agent de la MRP si leur température ne dépasse pas 15°C. Si par contre elle se maintient au-dessus de cette valeur pendant deux à quatre semaines, la maladie cause une mortalité importante chez les truites.

- > Le déclin de la pêche est dû à une augmentation de la part de sédiments fins.
- > Un déficit de l'offre alimentaire est à l'origine de la baisse des captures.
- > Une modification du régime thermique des eaux a entraîné un déclin des populations piscicoles.
- > La baisse des captures de poisson est due à une modification des régimes d'écoulement et du charriage.

Il ressort globalement de l'étude que, prise individuellement, aucune des hypothèses précitées n'était capable de provoquer les phénomènes de déclin et de régression constatés. La conjonction de plusieurs perturbations et dégradations est à l'origine du déclin général constaté. La part de responsabilité des différents facteurs impliqués est cependant propre à chaque région, voir à chaque cours d'eau.

Par ailleurs, dans le cas du Doubs jurassien, les déficits piscicoles ont probablement un effet cumulatif logarithmique.

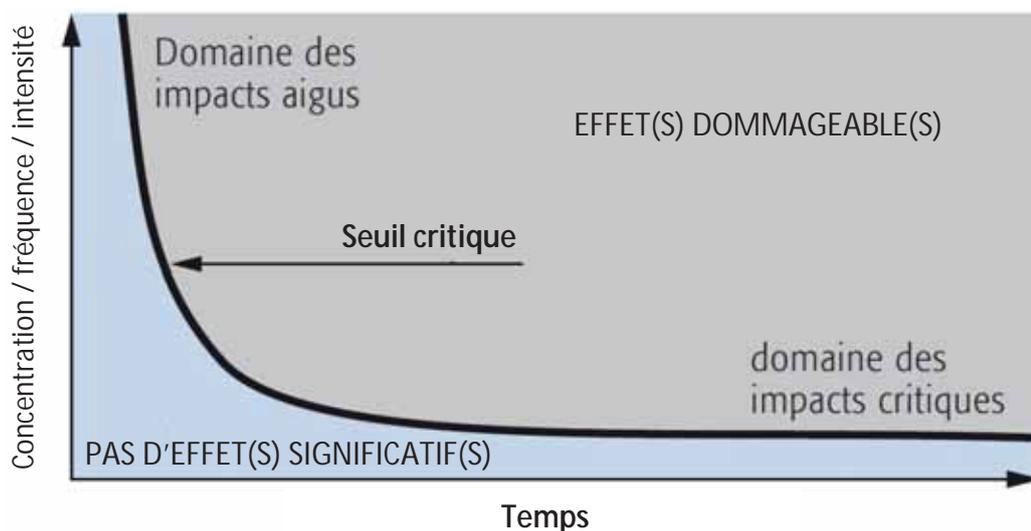


Figure 71 Relation entre la concentration, la fréquence, l'intensité, d'une contrainte et la durée d'exposition pendant un événement (modifié d'après Vladimir, 2005⁵⁴).

Un autre concept de cumul des impacts piscicoles applicable au Doubs est présenté sur la figure ci-après.

Les principaux déficits présentés dans les chapitres suivants sont ceux identifiés pour la faune piscicole en regard de la situation naturelle potentielle et sur la base de la littérature ainsi que de l'expérience acquise par AQUARIUS.

Divers effets liés au repeuplement sont traités synthétiquement à l'annexe AQ-9.

⁵⁴ Vladimir K., Andreas F., Simon K., Luca R., 2005 : *Projet «STORM: assainissement par temps de pluie»* Impact des rejets pluviaux urbains sur les milieux récepteurs. Projet initié par l'EAWAG et l'OFEV.

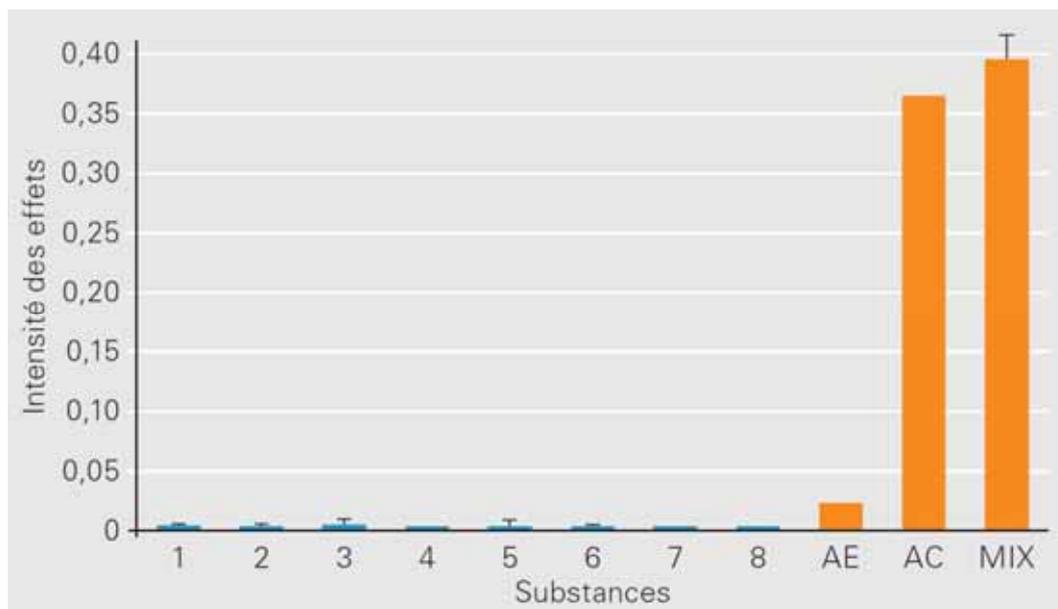
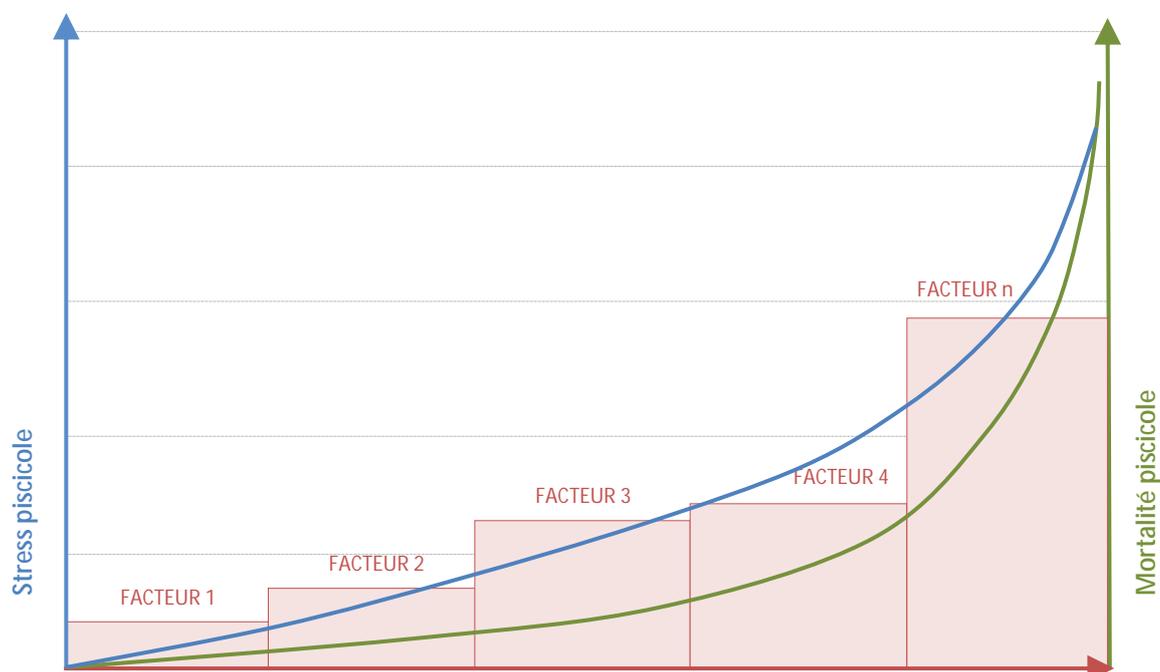


Figure 72 Les effets de huit composés oestrogéniques ont été évalués individuellement (1 à 8). La somme des effets ainsi déterminés fait état d'un potentiel oestrogénique (AE = addition des effets) nettement plus faible que celui d'un mélange des huit substances déterminé expérimentalement (MIX). Si on applique le principe de l'addition des concentrations (AC), l'effet calculé atteint le niveau expérimental (modifié d'après Silva et al., 2002⁵⁵).



Nombre de facteurs de stress dont l'intensité est liée à la durée d'exposition, à l'intensité et à la fréquence des événements

Figure 73 Relation entre les facteurs de stress et la mortalité piscicole (AQUARIUS 2010).

⁵⁵ Silva E., Rajapakse N., Kortenkamp A. (2002): Something from « nothing » – Eight weak estrogenic chemicals combined at concentrations below NOECs produce significant mixture effects. Environmental Science & Technology 36, 1751–1756.

8.3.5.1 *Perturbation de l'activité de reproduction*

Plusieurs espèces piscicoles, telles que la truite et l'ombre de rivière par exemple se reproduisent habituellement en bonne partie sur les bancs d'alluvions de faible profondeur (20 - 80 cm). Les variations de niveau provoquées par les éclusées affectent ces frayères de plusieurs manières :

- > Les frayères peuvent par exemple de trouver à sec si la reproduction a eu lieu à débit élevé; la survie des œufs est alors compromise (Nelson, 1986; Fraley et *al.*, 1989 ; Gore et *al.*, 1989).
- > Si au contraire le frai a lieu à un débit faible, le turbinage de pointe est susceptible d'augmenter notablement les vitesses. Nelson (1986) parle de dérive des œufs.

Dans le cas du Doubs franco-suisse, plusieurs études récentes (CSP, 1995 ; CSP, 1999 ; Degiorgi et Champigneulle, 2000) démontrent une influence négative du régime hydraulique sur le recrutement naturel en juvéniles de truite (cf. Figure 30, p. 45).

Klaus Riegler (1985) a dénombré sur la zone amont du Doubs franco-suisse des phénomènes d'exondation de frayères entraînant de fortes mortalités des œufs. Il a recensé en 1984 sur un linéaire de 1.6 km situé depuis l'usine du Torrent (usine de turbinage du Châtelot) jusqu'au lieux-dit « les Gravier » la proportion de frayères mise à sec en raison des variations artificielles de débit de l'usine précitée. Les résultats obtenus sont les suivants :

Date	Frayères observées	Frayères à sec	Proportion de frayères à sec
06.12.84	80	26	32.5 %
12.12.84	133	32	24.0%
31.12.84	121	30	24.8%

Tableau 31 Dénombrement des frayères mises à sec lors de opérations de turbinage par éclusées du Chatelot (D'après Riegler K., 1986). L'auteur de l'étude conclu que sur les 3 km à l'aval de l'usine du Torrent, au moins 25% des œufs pondus ont été perdus pour la rivière lors des observations.

En résumé, la fonctionnalité d'une quantité non estimée mais vraisemblablement très importante de sites de reproduction est fortement impactée. Les sites de frai les plus touchés perdent ainsi leur attractivité et leur fonction, il peut en résulter, pour certains poissons, une diminution ou une interruption du frai.

8.3.5.2 *Mortalité des alevins, juvéniles et petites espèces*

La rapide variation du niveau de l'eau ainsi que l'amplitude importante du marnage (fonction de la morphologie du cours d'eau) ont un impact important sur les juvéniles et certaines petites espèces qui affectionnent particulièrement les secteurs avec une faible hauteur d'eau. A titre d'exemple, après leur éclosion, les alevins vésiculés (stade dit "larvaire") des truites restent inféodés aux zones à gravier peu profondes, à l'intérieur desquelles ils se réfugient à la moindre alerte. Des poissons peuvent alors s'échouer ou se trouver piégés à la descente des eaux (Malavoi et Carrel, 1986; Bain et *al.*, 1988; Hicks et Jowett, 1992; Moog, 1993). Ce type de cas a été observé à plusieurs reprises par les

pêcheurs, notamment en aval du barrage du Châtelot⁵⁶. De manière générale, Bain et *al.* (1988) observent dans des cours d'eau soumis à éclusées une diminution de la densité ou une disparition de petites espèces vivant en bordure au profit d'espèces généralistes.

8.3.5.3 *Qualité des eaux et du sédiment*

Les considérations relatives à la qualité des eaux sont traitées au chapitre 7. Physico-chimie. Il ressort globalement que les eaux souffrent d'apports trop importants en substances contribuant au processus d'eutrophisation. Ce phénomène est périodiquement accentué lors des périodes d'étiages prolongés où il contribue notamment à la prolifération d'algues ainsi qu'à la diminution nocturne du taux d'oxygène dissous.

Diverses autres analyses systématiques ou ponctuelles mettent également en évidence des contaminations diffuses en diverses substances d'origine anthropique (industries, agriculture, sylviculture etc.). Ponctuellement et localement, des concentrations problématiques pour les biocénoses aquatiques sont rencontrées, spécialement dans les retenues des bassins de stockage dans lesquels se déposent préférentiellement les polluants présents sous forme particulaire.

Il est extrêmement difficile de déterminer l'impact de ces polluants. En effet, les concentrations mises en évidence sont rarement directement létales ou problématiques à court terme. On ignore en plus encore beaucoup des interactions de certaines substances et de leurs effets conjugués.

Prises individuellement, plusieurs substances sont toutefois déjà actuellement en concentration suffisante pour provoquer des effets écotoxicologiques indésirables reconnus lors d'exposition prolongée, telles les nitrites par exemple, ou tendent à se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire; citons notamment les métaux lourds, HAP et PCB (cf. « 8.2.4.2 Spear Index » et « Figure 50, chapitre 8.1 Périphyton »).

De plus, à la pollution chimique viennent se surimposer certains stressors tels que le réchauffement des eaux et l'intensification du rayonnement UV dont l'importance pourrait à l'avenir s'accroître suite aux changements climatiques et environnementaux.

8.3.5.4 *Atteinte aux ressources alimentaires*

Les invertébrés benthiques constituent la très grande majorité du régime alimentaire de la faune piscicole du Doubs. Les études sur l'effet des éclusées reposant sur l'analyse de résultats in situ montrent le plus souvent que la diversité, l'abondance et la biomasse des peuplements d'invertébrés sont réduites sous l'effet des éclusées (Garcia de Jalon et *al.*, 1988; Casado et *al.*, 1989; Bretschko et Moog, 1990; Weisberg et *al.*, 1990; Moog, 1993).

Les surfaces périodiquement inondées et exondées ne sont plus propices au développement des invertébrés; peu d'insectes aquatiques peuvent s'installer dans des zones aussi fréquemment mises à sec (Fisher et Lavoy, 1972 ; Brusven et MacPhee, 1976; Cushman,

⁵⁶ Degiorgi F., Champagneulle A., 2000. Diagnose piscicole et mesure de l'efficacité des alevinages en truite sur le Doubs Franco-Helvétique. Rapport final Etude CSPINRA, 119 p.

1985; Weisberg et *al.*, 1990). Les surfaces habitables sont donc réduites aux surfaces disponibles à débit plancher (Gore et *al.*, 1989).

Sur les secteurs à la morphologie la plus sensible aux marnages, l'offre alimentaire pour la faune piscicole est par conséquent très fortement diminuée, en particulier pour les espèces ou juvéniles vivant dans ces microhabitats.

8.3.5.5 *Déplacements et dévalaison*

De nombreuses autres espèces de poissons effectuent des migrations à la recherche de sites de frai. Ces migrations sont certes plus modestes mais peuvent facilement atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Citons notamment à titre d'exemple : La truite et l'ombre de rivière ; le barbeau commun ; la vandoise. D'autre part, les poissons effectuent de manière générale des déplacements de plus ou moins longue distance pour se nourrir, se cacher, ou se disperser. On notera également qu'ils effectuent des déplacements saisonniers en fonction de la température de l'eau notamment. La libre circulation des espèces est indispensable au brassage génétique et à la dispersion spatiale des populations. Elle permet également l'accès à des zones de refuge lors d'une pollution par exemple. La vitesse, la température ainsi que les hauteurs d'eau sont les principaux paramètres influençant les déplacements piscicoles.

L'impact des éclusées sur les déplacements piscicoles réside avant tout dans la rapidité de l'augmentation du débit ainsi que la fréquence des éclusées. Des mouvements de dévalaison sont observés lors d'éclusées par Cowx et Gould (1985) ainsi que Bain et Boltz (1989). Aucune étude spécifique n'évalue toutefois ce phénomène à l'échelle de tout le spectre piscicole du Doubs ni pour les activités de montaison. Liebig et *al.* 1998 démontrent que les éclusées entraînent systématiquement une dérive forcée des alevins de truite de rivière (*Salmo trutta*). Cette dérive intervient principalement au démarrage de l'éclusée et est d'autant plus forte que le débit plancher est faible.

Les petits affluents comme habitats refuges sont par conséquent de première importance pour certaines espèces et également pour le repeuplement naturel des rivières principales (Schager et *al.* 2007).

8.3.5.6 *Perturbation des habitudes et du cycle de vie.*

En période d'éclusée, la fluctuation journalière de multiples paramètres hydrauliques entraîne une modification du comportement des poissons dans leur mode et période d'alimentation, dans l'utilisation des caches et zones de refuge, dans le choix des sites de reproduction etc. Les recherches sur le sujet relèvent, comme les études le confirment sur le Doubs, que l'impact de ces effets sur les peuplements de poissons est variable et peut notamment se traduire par une réduction des biomasses (Casado et *al.*, 1989; Moog, 1993) ainsi que des changements dans l'abondance relative des différentes espèces (Bain et Boltz, 1989).

Plusieurs auteurs (Poff, 1992) s'accordent à dire qu'un profond déséquilibre est susceptible de s'installer au sein des peuplements piscicoles à partir d'un certain seuil si l'offre et la qualité en sites refuges n'est pas suffisante.

8.3.5.7 Evolution des régimes thermiques

La température des eaux suisses a augmenté d'environ 1°C entre 1978 et 2002⁵⁷. Sur le Plateau, ce phénomène défavorise de manière générale les espèces sensibles à un réchauffement de l'eau telles que la truite et l'ombre de rivière, notamment par la propagation de maladies telles que la MRP (maladie rénale proliférative) et également par l'augmentation du stress lié à des épisodes de températures et d'oxygénation défavorables plus fréquents. Aucune preuve concrète n'a toutefois pu être apportée sur l'incidence de ce phénomène sur les peuplements piscicoles du Doubs.

Le manque local d'ombrage lié à l'absence de ripisylve arborescente bien développée sur un linéaire non négligeable du Doubs joue probablement également un rôle sur l'échauffement local de l'eau.

Des travaux de Crisp (1981; 1988) ont montré l'importance de la température pendant la période d'incubation des œufs sur la date d'émergence des Salmonidés.

La température peut également intervenir dans l'utilisation de l'habitat par les poissons. Dans une expérimentation conduite par Taylor (1988), il apparaît qu'elle influe sur l'utilisation des abris par des juvéniles de saumon chinook et coho (*Oncorhynchus tshawytscha* et *O. kisutch*). Heggenes et Traaen (1988) ont également montré que la vitesse critique de nage chez des alevins de quatre espèces de Salmonidés (*Salmo trutta*, *S. sazar*, *Salvelinus fontinalis*, *S. namaycush*) augmentait avec la température.

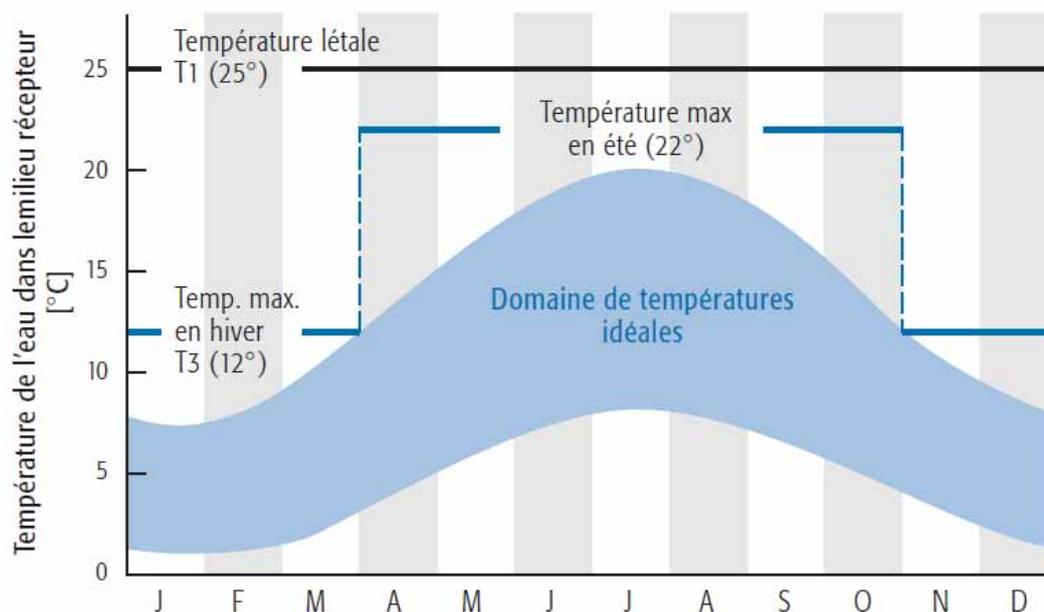


Figure 74 Plages de températures idéales pour le développement optimal des espèces de truites⁵⁸, ainsi que limites de température maximale en été (T1: 25 °C), température moyenne journalière tolérable (22 °C) et température maximale hivernale (12 °C).

⁵⁷ Fischnetz (2004). Sur la trace du déclin piscicole. Rapport final. EAWAG/OFEFP, Dübendorf, Bern.

⁵⁸ Hari R., Güttinger H. (2004): Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978–2002. Auswertungen und grafische Abbildungen fischrelevanter Parameter. Fischnetz-publikation. Projekt «Netzwerk Fischrückgang Schweiz», Teilprojekt-Nr 01/08, EAWAG, Switzerland, 96 pp.

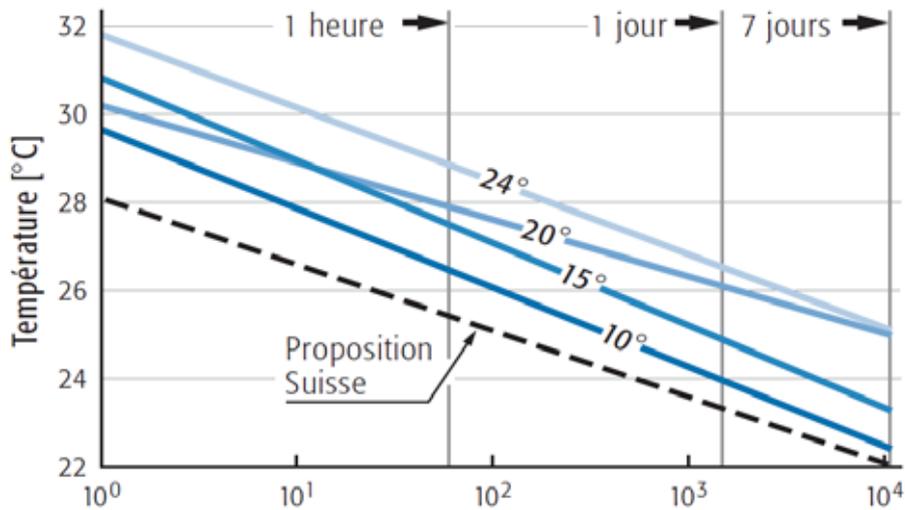


Figure 75 Température de survie de jeunes salmonidés (entre 1 et 3 ans) pour différentes températures d'acclimation (10, 15, 20, 24°C) en fonction de la durée d'exposition⁵⁹.

Les éclusées semblent également modifier notablement la température du Doubs à certaines périodes de l'année. Il semblerait que des vagues d'eau froide abaissent sensiblement ponctuellement la température de l'eau durant la période estivale. Ce phénomène n'est toutefois pas documenté et n'a, à notre connaissance, pas fait l'objet d'une étude approfondie. Il est donc impossible à ce stade de caractériser l'effet des variations thermiques provoquées par un régime d'éclusées dans un effet global sur les peuplements piscicoles. Il est toutefois indéniable que ces variations artificielles ont une influence sur le comportement des biocénoses aquatiques.

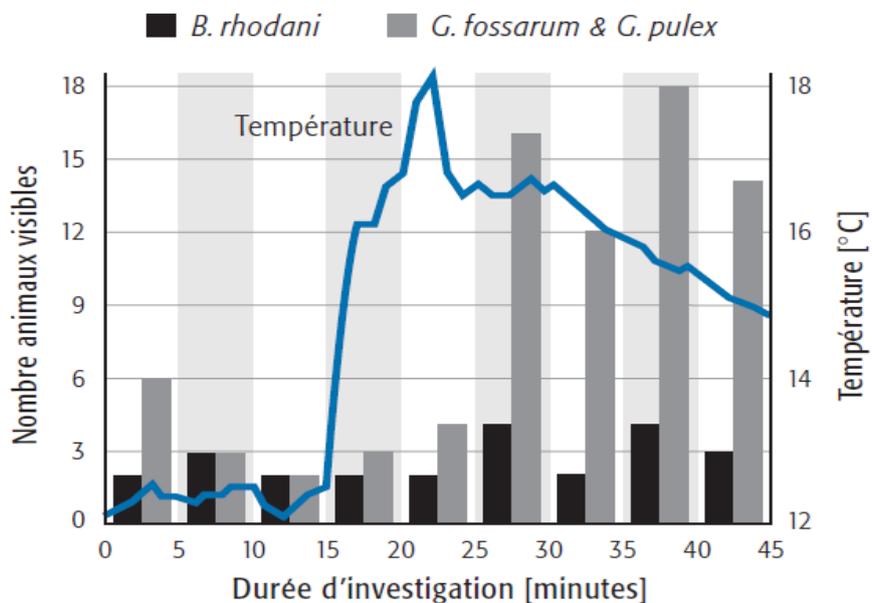


Figure 76 Influence d'une augmentation de température sur les invertébrés. L'«activité» des invertébrés est évaluée sur la base du nombre d'individu visible⁶⁰.

59 Rossi, L. und Hari, R. 2004c. Temperaturveränderungen im Gewässer bei Regenwetter; in: Projekt «STORM» Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter, Gas- Wasser-Abwasser, Nr.11:795–805.

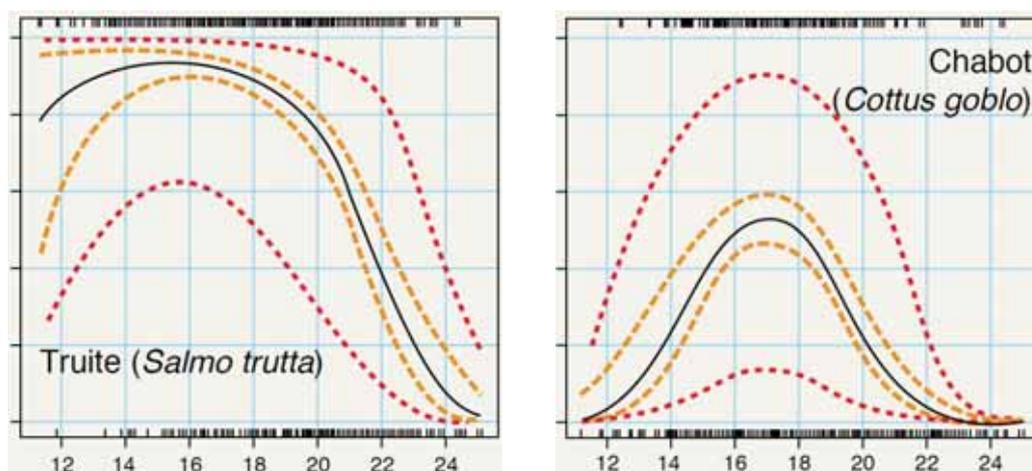


Figure 77 Profils marginaux de probabilité de présence⁶¹, pour chaque espèce, en fonction des températures estivales. En rouge : Erreurs de prédictions. En orange : Intervalles de confiance.

8.3.5.8 Maladies et organismes pathogènes

Ce domaine très complexe laisse ouvertes de nombreuses hypothèses. La MRP (maladie rénale proliférative) ainsi que d'autres maladies, champignons, parasites affectent de manière presque toujours conjuguée les poissons (développement prioritaire sur les poissons affaiblis pour une autre raison telle que la reproduction ou un stress par exemple).

Le spectre de recherche dans ce domaine est extrêmement vaste, notamment en raison du large éventail d'organismes susceptibles d'être problématiques ainsi qu'à l'apparition constante de nouveaux pathogènes. Seuls les deux principaux sont abordés ici.

Cyanobactéries

Les investigations effectuées par les cantons de Neuchâtel et du Jura suite à des mortalités piscicoles inhabituelles survenues entre 2009 et 2011 se sont tout d'abord orientées vers une recherche de cyanobactéries. Certains de ces organismes telles que par exemple les cyanobactéries benthiques des genres *Lyngbya*, *Oscillatoria* et *Aphanizomenon* ont en effet la particularité de produire, lorsqu'elles sont très abondantes et dans certaines conditions, des quantités suffisantes de toxines pouvant devenir mortelles pour les autres organismes aquatiques. Ce genre de cas est globalement assez localisé sur les cours d'eau et actuellement, il reste très difficile de prévoir l'apparition et l'impact des efflorescences de cyanobactéries sur ce type de milieux. Cependant, la communauté scientifique s'accorde pour indiquer que la fréquence de ce type d'événements va augmenter en lien avec les changements climatiques (Wiedner et al., 2007, Paerl et Huisman, 2008)⁶².

⁶⁰ Gammeter S., 1996. Einflüsse der Siedlungsentwässerung auf die Invertebraten-Zönose kleiner Fließgewässer. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.

⁶¹ Pont D., 2009 : Changement climatique : impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion. Synthèse du séminaire des 29 et 30 juin 2009, PARIS.

⁶² Wiedner C, Ruckner J, Brüggemann R, Nixdorf B (2007) Climate change affects timing and size of populations of an invasive cyanobacterium in temperate regions. *Oecologia* 152:473-484.

Pearl H. W., Huisman J., 2008 : Blooms like it hot. *Science*; 320:57-58.

Justement, de fortes abondances de cyanobactéries benthiques appartenant à l'espèce *Oscillatoria princeps* ont été observées au printemps 2010 dans la Loue (rivière constituée en partie des pertes du Doubs). Ces dernières ont été considérées comme très probablement liées à la forte mortalité piscicole observée à la même période sur cette rivière, justifiant l'inquiétude des autorités cantonales neuchâtelaises et jurassiennes et les contrôles réalisés sur le Doubs. Les recherches et investigations menées n'ont toutefois pas permis de mettre en évidence la présence de la cyanobactérie précitée ou de cyanotoxines, comme le montre l'annexe AQ-5 ainsi que les résultats présentés au chapitre 8.1 Périphyton.

Saprolegnia

Des compléments d'analyses sur des poissons visiblement malades ont été confiés au Nafus (laboratoire de diagnostic des maladies des poissons de l'université de Berne). Ces derniers ont mis en évidence, en sus de divers pathogènes et parasites courants, la présence quasi systématique sur les poissons de fortes érosions et ulcérations de la peau et jusque dans la musculature sous-jacente (cf. annexe AQ-6). Des examens plus poussés ont montré qu'il s'agissait de *Saprolegnia parasitica*. Bien connus en aquaculture, ce parasite oomycète provoque en élevage d'importantes mortalités sur les œufs et les alevins de salmonidés (Roberts et Shepherd, 1997). Il est semble-t-il présent dans les écosystèmes aquatiques d'eau douce à l'échelle planétaire.

Durant ces dernières années, les observations de cette maladie chez les salmonidés adultes se sont multipliées. La peau des salmonidés adultes est en effet sensible aux infections de ce parasite durant la phase de maturation des gonades ainsi que lorsque le poisson présente des dommages physiques liés à la migration (Neish et Hughes, 1980), ce qui peut expliquer notamment les fortes mortalités de poissons observées au printemps. La grande quantité de spores présents dans les cours d'eau lors de la phase de reproduction, le stress, mais aussi certains ectoparasites (Oldewage et Van As, 1987) sont des facteurs de risques supplémentaires. Dans les milieux naturels, *S. parasitica* a notamment été pointé du doigt comme contribuant au déclin des populations de saumons sauvages à travers le monde (Neitzel et al., 2004), (Van West, 2006).

Selon Willoughby (1989), la meilleure défense du poisson contre *Saprolegnia sp.* demeure l'élimination physique des spores attachées par le renouvellement du mucus. Un épiderme intact constitue probablement le meilleur moyen de défense contre les saprolegniosés (Haitai et Hoshiai, 1994; Pickering, 1994).

Face à ces constats inquiétants, un mandat a été confié à l'Université de Neuchâtel afin notamment de déterminer par des analyses génétiques si la souche de *S. parasitica* trouvée dans le Doubs était récente. Les premiers résultats de cette étude figurent à l'annexe AQ-7. Il ressort que les échantillons analysés sont probablement issus d'une population clonale (génétiquement très peu diversifiée) et que la présence de ce parasite est donc, si cette hypothèse devait être confirmée, très récente. Il n'a toutefois pas pu être établi de quelle manière ce pathogène est arrivé dans le Doubs. Des compléments et précisions sur ce sujet sont en cours d'étude.

8.3.5.9 *Problèmes liés aux algues*

Le périphyton en tant qu'indicateur de la qualité de l'eau est traité de manière détaillée au chapitre 8.1 Périphyton. Le présent chapitre traite uniquement de la problématique des proliférations algales sur la faune piscicole. Pour ce domaine, de nombreuses hypothèses, parfois peu précises, non étayées et provenant de différents milieux sont émises, dont notamment :

- > L'eutrophisation provoque un développement algal accru⁶³ ;
- > les éclusées favorisent le développement algal, notamment contredits en Suisse par Elber et *al.*, (2006)⁶⁴ ;
- > les éclusées favorisent le développement d'un tapis algal sur les surfaces exposées au marnage ;
- > les algues sont responsables du colmatage des alluvions et de la disparition d'habitats propices aux invertébrés aquatiques et à la faune piscicole⁶⁵ ;
- > certaines algues produisent des toxines responsables de mortalités piscicoles ;
- > les éclusées contribuent artificiellement au transport de grandes masses algales accumulées et développées dans les retenues.

Les données disponibles à ce stade ne permettent toutefois pas d'apporter des réponses claires et précises à bon nombre de ces hypothèses. Certaines proliférations algales ont néanmoins fait l'objet d'investigations ponctuelles, soit parce que l'on supposait qu'elles soient susceptibles de libérer des toxines problématiques pour la consommation d'eau à usage domestique ou mortelles pour la faune piscicole, soit parce qu'elles étaient visuellement spectaculaires, à l'image des études réalisées par Straub en 2004 et 2011 (cf. annexe AQ-8).

Relevons finalement que selon les suivis réalisés par la DIREN, des "bloom" algaux sont observés sur le bassin du Haut-Doubs depuis 1965 environ et sont récurrents depuis 1976. Des proliférations algales associées à des mortalités piscicoles ont ainsi été observées à plusieurs reprises sur le Doubs à l'amont des Brenets, notamment en 1976, 1983, 1989 et 1991. Des quantités importantes de cyanobactéries ont été relevées dans le tronçon aval de la station d'épuration de Pontarlier.

8.3.5.10 *Mortalité au travers des turbines*

Dans le cas où les mouvements et flux d'un cours d'eau sont essentiellement déterminés par l'utilisation de la force hydraulique, les poissons dévalant suivent le courant principal ce qui les emmène dans le secteur de la prise d'eau et ensuite vers les turbines (MUNLV 2005). Le passage à travers les turbines hydrauliques soumet le poisson à diverses contraintes

⁶³ Proliférations des algues en Franche-Comté - Observatoire de l'eau de la région Franche-Comté - décembre 1994.

⁶⁴ Elber, F., Hürlimann, J. & Niederberger, K. 1996. Algal monitoring as a basis for the management of flow regime in a regulated river. In : B.A. Whitton & E. Rott (eds). Use of algae for monitoring rivers II : 51-58.

⁶⁵ Paerl H W, Huisman J. (2008): Climate Blooms like it hot. Science 320 : pp. 57-58.

susceptibles d'entraîner des mortalités importantes. De nombreuses expérimentations ont été menées dans divers pays, notamment sur les salmonidés, pour déterminer les mortalités résultant du transit dans les principaux types de turbines.

Les mortalités peuvent s'avérer plus importantes pour certaines espèces. Chez les poissons physostomes (salmonidés, cyprinidés...), la régulation de la pression de la vessie natatoire peut s'opérer relativement rapidement par la bouche via le canal pneumatique. Ces espèces résistent bien aux variations brusques de pression. Par contre, chez les poissons physoclistes (perche, sandre.....), la régulation de la pression se fait beaucoup plus lentement par échange gazeux avec les vaisseaux sanguins de la paroi de la vessie natatoire. Le risque de rupture de cette dernière suite à un abaissement brutal de pression est donc beaucoup plus important (Larinier & Travade 1999).

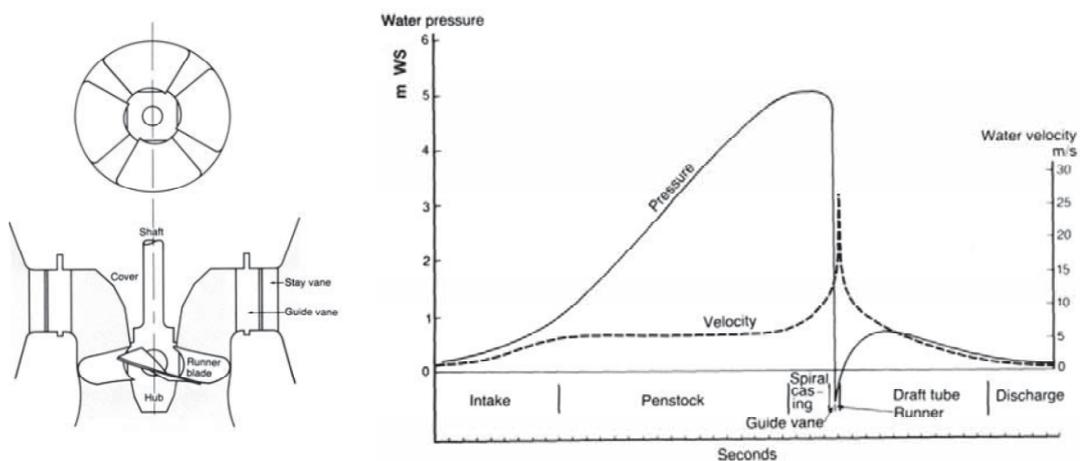


Figure 78 A gauche, aperçu d'une turbine de type Kaplan vue de dessus et profil en travers. A droite, pression dans une turbine Kaplan. Tracé de la pression de l'eau (ligne continue) et vitesse du courant (ligne discontinue) par la turbine depuis l'entrée de la centrale jusqu'à la sortie en aval. Adapté d'après (Monten, 1985).

De nombreuses simulations ont été élaborées afin de prédire les blessures et taux de mortalité provoqués par les turbines. Les expériences et observations menées ces dernières années ont montré que ces différentes formules ne permettaient que d'obtenir un « ordre de grandeur » des dommages (notamment Larinier & Travade, 2002 ; Monten, 1985 ; Raben, 1957).

La mortalité piscicole est généralement totale sur les turbines Pelton, très importante sur les turbine Francis et faible à moyenne sur les turbines Kaplan. La configuration des prises d'eau (système de répulsion, vitesse d'eau etc.) est par conséquent déterminante dans l'évaluation de cette problématique.

Sur le Doubs franco-suisse, aucune étude n'a à notre connaissance été réalisée de manière globale (incidence par installation et incidences cumulées) pour évaluer la mortalité piscicole potentiellement induite par le passage des poissons dans les turbines des installations hydroélectriques. Précisons dans ce contexte que des microcentrales sont actuellement projetées et que des installations existantes sont en cours de renouvellement de concession (amélioration potentielle des dispositifs de répulsion piscicole).

9. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Les investigations réalisées dans le cadre du présent diagnostic donnent pour la première fois une vue d'ensemble de la qualité des eaux de surface du bassin du Doubs neuchâtelois. Il s'agit d'une synthèse ciblée de nombreuses études réalisées sur le Doubs franco-suisse ainsi que d'une évaluation qui fournit une appréciation homogène à l'échelle du territoire étudié. Ajoutons que le présent document constitue également un outil de comparaison avec les autres portions du Doubs et un référentiel indispensable pour le suivi de l'efficacité de la mise en œuvre des mesures d'assainissement projetées à court et moyen terme sur ce cours d'eau.

Le diagnostic réalisé confirme que les apports en substances organiques et divers autres polluants provenant du cours situé à l'amont du territoire suisse sont significatifs. Ceci est notamment observé au Clos Rondot qui se situe à l'amont du lac de Chaillexon (F). Les études françaises montrent en effet que l'influence anthropique sur la qualité des eaux du Doubs est importante déjà en tête de bassin et se poursuit jusqu'au Doubs franco-suisse. Diverses actions sont actuellement entreprises en France pour affiner les diagnostics des apports en polluants ainsi que pour assurer la mise en place d'un programme de mesures, décliné dans un schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), actuellement en cours de révision.

Juste à l'aval du Clos Rondot, sur territoire suisse, au niveau du lac des Brenets s'ajoutent les apports des polluants de la Rançonnière. Ce ruisseau constitué presque exclusivement des eaux traitées des rejets des stations d'épuration des communes du Locle et des Brenets concentre une part importante des polluants provenant du bassin du Doubs Neuchâtelois. Un projet est actuellement développé pour transformer et améliorer notablement ces installations vétustes dont le fonctionnement doit aujourd'hui être qualifié de mauvais. A partir de ce point, on remarque ensuite jusqu'approximativement à l'amont de « Maison Monsieur », une amélioration progressive de la qualité de l'eau liée à l'activité biologique de la rivière et son action autoépuration. Plusieurs indicateurs biologiques confirment ensuite à la hauteur de « La Rasse » que des apports, sous forme de sources, influencent négativement la qualité des eaux du Doubs. Ces apports sont notamment contaminés par les infiltrations des eaux traitées de la STEP de la ville de La Chaux-de-Fonds qui rejette actuellement les eaux traitées dans la Ronde, petit cours d'eau dont une partie s'infiltré dans le Karst et le solde se déverse dans la retenue du Refrain à Biaufond. Cette installation de traitement a été modernisée en 2003. En raison toutefois de plusieurs facteurs (géologie, topographie, système unitaire, etc.), elle ne peut pas traiter toutes les eaux lors de fortes pluies ou de fonte importante des neiges, et une partie de ces eaux usées mélangées aux eaux claires est directement acheminée dans une perte karstique. Plusieurs pistes sont actuellement à l'étude pour améliorer cette situation. A l'aval de la retenue du Refrain, on constate à nouveau une autoépuration du Doubs avec une amélioration de la qualité de l'eau. Il est possible que des apports de polluants d'origines agricole ou sylvicole surviennent ponctuellement. La maille d'échantillonnage de la présente étude n'est toutefois pas assez fine pour apporter des réponses précises à ce sujet. Le mauvais état écologique du Doubs ne saurait toutefois s'expliquer uniquement sur la base de ces altérations « chimiques » qui, globalement, n'atteignent pas des seuils susceptibles de provoquer des impacts aigus (à

court terme) sur les biocénoses aquatiques. Plusieurs facteurs aggravants jouent également un rôle prépondérant, ceci étant particulièrement marqué en 2010-2011. Il s'agit de l'exploitation hydroélectrique (notamment les éclusées), de l'apparition présumée d'un nouveau pathogène (*Saprolegnia parasitica*) ainsi que d'un déficit hydrique naturel exceptionnel et prolongé. Précisons que des essais de démodulations ont été réalisés, avec comme objectif de parvenir à atténuer à l'avenir les effets des éclusées de l'installation hydroélectrique du Châtelot. En conclusion, ce sont les nombreux perturbateurs d'origines anthropiques, s'ajoutant à des conditions climatiques naturelles variables et parfois défavorables, qui sont les causes d'altération du Doubs. Par ailleurs, l'origine des perturbations est globalement diffuse et survient en de multiples points du bassin versant du Doubs.

Pour expliquer cette complexité, citons comme exemple l'année 2011 où de longues périodes d'étiages ont notamment favorisé de forts développements d'algues, probablement également de pathogènes et n'ont pas permis une dilution optimale des apports de substances d'origines anthropiques (autoépuration). A ces mêmes périodes, il est intéressant de remarquer que les variations artificielles de débits (éclusées) étaient très faibles, voire inexistantes et que l'absence de crues a notamment permis de limiter la destruction des frayères de salmonidés et l'entraînement des alevins. Entre fin 2011 et début 2012 sont survenues plusieurs hautes eaux qui ont permis de diluer certaines substances polluantes et de « nettoyer » le substrat du lit du Doubs en le débarrassant localement des sédiments fins et algues qui le colmataient. Ces forts débits sont toutefois survenus durant la période de reproduction de la truite de rivière et sont susceptibles d'avoir endommagé, voire détruit une partie du frai. Précisons également que ce sont durant ces périodes de fortes précipitations que certains systèmes d'épuration sont saturés, débordent et déversent dans le bassin du Doubs des eaux peu ou pas traitées, néanmoins fortement diluées. Finalement, ces apports d'eaux conséquents ont permis aux installations hydroélectriques de remplir leur retenues et de pratiquer à nouveau des éclusées d'amplitude maximale.

Du point de vue de la biodiversité, il est intéressant de mentionner que le Doubs présente encore des peuplements d'invertébrés aquatiques parmi les plus diversifiés de Suisse. Une régression significative s'observe toutefois dans certains groupes polluosensibles dont la diversité en espèces et l'abondance ont nettement diminués par rapport aux relevés de Verneaux (1973). Les grandes perles (Plecoptera, famille des Perlidae, Perlodidea) et les grandes éphémères (Ephemeroptera, famille des Heptageniidae), dont plusieurs espèces appartenant aux listes rouges des espèces menacées de Suisse, semblent particulièrement touchées par cette régression. Des indices et observations ponctuelles mettent en cause le régime d'éclusées actuel du Doubs, mais une relation de cause à effet reste à prouver.

La biodiversité de diatomées est en revanche du même ordre qu'en 1963 avec la même abondance de taxons de la liste rouge actuelle d'Europe centrale.

Concernant la faune piscicole, on observe globalement une nette diminution de l'abondance des espèces caractéristiques (peuplements dont la structure est souvent altérée). Le nombre total d'espèces reste en revanche élevé, principalement en raison de l'influence des bassins de retenue d'où proviennent des espèces de milieux lenticques ainsi que de l'apparition/introduction de nouvelles espèces.

10. ACTIONS PRIORITAIRES

Si des études complémentaires sont indispensables à mettre en œuvre, la priorité consiste toutefois préalablement à assainir dans les plus brefs délais les éléments perturbateurs d'origine anthropique qui ont été clairement mis en évidence par cette étude à savoir :

> **Régime hydrologique**

Sur la base des essais de démodulation effectués, atténuer les impacts provoqués par les éclusées de l'exploitation hydroélectrique du Doubs.

> **Qualité des eaux**

Un assainissement des apports d'eaux polluées mis en évidence doit également être mis en œuvre rapidement. Il s'agit en particulier de l'assainissement des stations d'épuration des eaux usées (STEP) du Locle et des Brenets ainsi que de l'amélioration de l'efficacité de la STEP de la Chaux-de-Fonds. Les eaux provenant du territoire français doivent faire l'objet d'une démarche identique urgente et simultanée.

De plus, des mesures préventives doivent être prises pour réduire au maximum les risques de propagation de *Saprolegnia parasitica* à d'autres écosystèmes aquatiques que le Doubs. La nécessité et la faisabilité d'investiguer le mode de propagation et l'origine de ce pathogène doivent également pouvoir être évalués très rapidement.

11. ETUDES COMPLÉMENTAIRES

L'objectif de la présente étude était d'établir un diagnostic pluridisciplinaire du Doubs, elle n'a pas la prétention de résoudre les problèmes rencontrés dans le Doubs. Si certains impacts sont mis clairement en évidence, d'autres pistes sont proposées et constituent plus des hypothèses que des faits avérés et observés dans ce cours d'eau. L'énigme est d'autant plus profonde que le Doubs ne paraît pas beaucoup plus pollué que d'autres grandes rivières d'Europe centrale.

La présente étude n'a malheureusement pu être fondée (à part pour la chimie des eaux courantes) que sur une seule série homogène, concertée et synchronisée de prélèvements et de mesures, ceci essentiellement en dehors d'événements météorologiques majeurs (car les campagnes doivent être budgétisées à l'avance et que les intervenants n'ont pas la liberté de réagir au pied levé). Les études suivantes pourraient en ce sens compléter la réflexion et affiner le diagnostic :

> **Chimie des eaux et des sédiments**

Des objectifs clairs devraient être formulés pour les paramètres et groupes de substances qui doivent être recherchés, notamment :

- Les substances indispensables à analyser pour pouvoir réaliser une interprétation cohérente (p. ex, forme réduite des ions minéraux, taux d'oxygène dissous sur le fond et dans les eaux interstitielles, etc.) dans le but de pouvoir décrire certains

phénomènes (p. ex. remobilisation, potentiel redox, etc.) et être comparable avec les investigations sur le territoire français.

- Les substances dont on sait ou dont on présume qu'elles sont présentes dans le bassin versant ou les affluents, à l'image par exemple de certains Pyréthrinoides utilisés en sylviculture ou en agriculture ainsi que les PCB mis en évidence par la France.
- Pour les paramètres de base, un minimum de 12 échantillons étalés sur une année constitue selon le standard fédéral un minimum pour avoir une vue d'ensemble de la qualité d'un cours d'eau.

La maille d'investigation devrait également ponctuellement être resserrée, en particulier pour la mise en évidence de pollutions potentielles provenant des activités agricoles, sylvicoles locales ou de déversements plus ponctuels (hypothèse d'apports de polluants au « Saut du Doubs » ainsi qu'à l'amont de « La Rasse »).

Un programme de surveillance des eaux de sources alimentant le Doubs franco-suisse devrait être mis sur pied au même titre que la surveillance des rejets et cours d'eau pollués. Les eaux de sources contribuent probablement de manière significative à l'amélioration de la physico-chimique et biologique du Doubs à l'aval du barrage du Châtelot. Une baisse de la qualité et des débits de ces eaux participe (participerait) à la dégradation générale de la qualité du cours d'eau.

Le canton du Jura projette en un point la mise en place d'un système de mesure de la qualité de l'eau en continu. Ce type d'installation permettra d'apporter sur le Doubs franco-neuchâtelois des informations précieuses notamment quant à la capacité autoépuratrice du cours d'eau.

> **Diatomées**

Faire un suivi annuel (minimum tous les deux mois) des peuplements de diatomées en eau courante dans des stations problématiques du Doubs, où la charge polluante est critique ou a été critique : Clos-Rondot, Hôtel du Saut et/ou Rapides de la Rasse. Ce genre de suivi permettrait de savoir si les nuisances sont permanentes à ces endroits ou occasionnelles. Cela permettrait aussi d'analyser l'état des peuplements avant et après des événements d'origine météorologique (crues, étiages importants, fortes insolation de type caniculaire) ou d'événements accidentels (pollutions par hydrocarbures, lisier, incendies, etc.). Cela permettrait aussi de savoir si les sources connues de pollution permanente (La Raçonnière, les résurgences de la Ronde) ont un impact constant ou variable sur le Doubs.

> **Cyanobactéries**

En eau stagnante, par exemple au Châtelard (peu pollué) et au Pont International (pollué), suivre plusieurs fois au cours de l'année un transect à travers la rivière pour mettre en évidence :

- les fluctuations qualitatives de peuplements au cours de l'année et particulièrement lorsque des conditions caniculaires apparaissent;

- où se situent les principaux peuplements de cyanobactéries : au bord, au centre du chenal, en eau stagnante?

> **Phytoplancton**

Etablir un suivi plus serré du phytoplancton au lac de Brenets (éventuellement aussi à Moron) pour établir le cycle annuel de ce compartiment, afin de savoir si les variations de peuplement enregistrent les fluctuations saisonnières (bon état du milieu pour une typologie lacustre donnée) ou si ces fluctuations sont banalisées par l'impact des polluants.

> **Macrofaune benthique**

Etablir un suivi normé et plus fréquent du Doubs franco-neuchâtelois, si possible coordonné avec le programme de surveillance des cours d'eau de l'ENV du Canton du Jura et les suivis français. En 2011, les relevés selon la méthode IBCH ont été effectués simultanément entre le Saut-du-Doubs et Ocourt sur 4 stations neuchâteloises et 6 stations jurassiennes. En 2013, le canton du Jura répétera ses relevés sur le Doubs et une synchronisation avec le programme neuchâtelois apporterait des informations précieuses pour l'interprétation des résultats (variations temporelles et spatiales des peuplements d'invertébrés indicateurs). Le matériel récolté lors de ces campagnes devrait systématiquement être valorisé par :

- Une détermination à l'espèce des groupes indicateurs, amplifiant les informations à disposition du diagnostic du cours d'eau (données autoécologiques des espèces) ;
- une détermination semi-quantitative de la biomasse benthique au mètre carré, amplifiant les informations à disposition du diagnostic du cours d'eau en regard de l'impact des éclusées (macrozoobenthos, indicateurs utilisés dans le cadre de l'assainissement des éclusées [Baumann et al. 2012]) ;
- une utilisation des nouvelles métriques en cours de validation (indice écotoxicologique SPEARpesticides [Beketof et Liess 2008]).

Listes rouges EPT (Ephémères, Plécoptères, Trichoptères [Lubini et al. 2012])

Mettre sur pied un programme de relevé des espèces aquatiques menacées permettant une comparaison claire de l'évolution de la biodiversité du Doubs durant les 40 dernières années et un état des lieux bien documenté pour appréhender les changements futurs (positif ou négatif). Il s'agit en particulier d'effectuer les travaux suivants :

- Inventaire des EPT sur 4 à 8 stations du Doubs neuchâtelois basés sur des relevés IBCH complétés par des prélèvements permettant de couvrir la phénologie de l'ensemble des groupes indicateurs (3 prélèvements complémentaires par stations et par année, basés sur la méthodologie mise en place dans le cadre du projet MEPT [Lubini et al. 2012]).

> **Faune piscicole**

La réalisation de prélèvements de poissons nécessaire à l'évaluation des phénomènes de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire reste un point d'étude important.

Les sites de prélèvement ainsi que la fréquence des investigations devraient être adaptés en fonction des résultats. La mise en œuvre doit toutefois répondre aux exigences minimales suivantes :

- Investigation sur 2 sites minimum, dont au moins un lac ou une retenue;
- seule la chair de poissons prédateurs (en particulier truite de rivière, brochet et silure) suffisamment grands, d'un âge estimé à au moins 3 ans sera analysée;
- au minimum 4 poissons par site seront analysés.

Concernant les pêches exhaustives, les stations suivies actuellement par la France, le canton de Neuchâtel et le canton du Jura couvrent de manière relativement bonne le Doubs suisse et franco-suisse. Il n'est dans ce sens pas nécessaire de prévoir des stations supplémentaires. Concernant la station suivie par le canton de Neuchâtel en 2011 aux « Gravier », celle-ci doit être déplacée sur un tronçon pouvant être pêché efficacement dans sa totalité, sans embarcation. De plus, en regard de l'efficacité de la pêche 2011, des moyens supplémentaires, notamment au niveau du matériel et du nombre des opérateurs devront pouvoir être mis en œuvre pour réaliser des pêches exhaustives et obtenir des résultats comparables à ceux obtenus par l'ONEMA et le canton du Jura.

> **Hydrologie**

Les résultats des essais de démodulations doivent être étudiés et exploités dans la perspective de la mise en œuvre de mesures concrètes d'amélioration des atteintes provoquées par les éclusées liées à l'exploitation hydroélectrique.

12. PRINCIPALE BIBLIOGRAPHIE CONSULTÉE ET CITÉE

- Agence de l'eau, 2011a : Etude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Rapport de données brutes et interprétation. Lac de Chailloux, suivi annuel. Rapport no 08-283/2011-PE2010-06 de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse 37 p. et annexes.
- Agence de l'eau, 2011b : Etude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Rapport de données brutes et interprétation. Retenue du Châtelot (25), suivi annuel. Rapport no 08-283/2011-PE2010-10 de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse 38 p. et annexes.
- Bain M.B. & Boltz J.M., 1989 : Regulated streamflow and warm water stream fish: a General Hypothesis and Research Agenda. V.5. Fish and Wildlife Service, Alabama, Biological report 89 (18), 28 p.
- Bain M.B., Finn J.T. & Booke H., 1988: Streamflow regulation and fish community structure. *Ecology*, 69 (2), 382-392.
- Baumann P., Kirchofer A., Schälchli U. 2012: Assainissement des éclusées – Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n°1203 : 127p.
- Beketov MA, Liess M, 2008 : An indicator for effects of organic toxicants on lotic invertebrate communities: independence of confounding environmental factors over an extensive river continuum. *Environmental Pollution*, 156, 980-987.
- Bernard, R. & Straub, F., 2010: Observation de la qualité des eaux de surface du canton du Valais. Campagne 2009-2010 : La Navisence. Rapport Bureaux ETEC Sàrl et PhycoEco pour le Service de la protection de l'environnement (canton du Valais), 75 p. et 4 annexes.
- Blant, D. & Jeannin, P.-Y., 2003 : Des eaux ... à tous les niveaux. In : M. Blant (ed.). Point(s) d'eau. Affaires culturelles et institutions culturelles, La Chaux-de-Fonds, 31-45.
- Bretschko G. & Moog O., 1990: Downstream effects of intermittent power generation. *Wat. Sci. Tech.*, 22 (5), 127-135.
- Brusven M.A. & MacPhee C., 1976 : The Effects of River Fluctuations resulting from Hydroelectric Peaking on Selected Invertebrates and Fish. Idaho Water Resources Research Institute, University of Idaho, Moscow, Idaho, USA, Project A-035-IDA, 46 p.
- Casado C., Garcia De Jalon D., Del Olmo C.M., Barcelo E. & Menes F., 1989: The effect of an irrigation and hydroelectric reservoir on its downstream communities. *Regulated Rivers: Research & Management*, 4, 275-284.
- Cowx L.G. & Gould R.A., 1985: The effects of short-term regulation releases from an impoundment on downstream fish fauna. *Aquaculture and fisheries management*, 1, 257-264.
- CSP, 1995 : Etat de santé des populations salmonicoles et impacts des repeuplements sur le Doubs franco-helvétique. Rapport préliminaire : bilans des peuplements et résultats des marquages en 1994. Rapport CSP n° 5-09-95, 1 vol., 34 p.
- CSP, 1999 : Gestion Piscicole. Interventions sur les populations de poissons. Repeuplement des cours d'eau salmonicoles. Collection mise au point, 1 vol., 256 p.
- Crisp D. T., 1981: A desk study of the relationship between temperature and hatching time for eggs of five species of salmonid fishes. *Freshwater Biology*, 11, 361-368.

- Crisp D.T., 1988: Prediction, from temperature, of eyeing, hatching and « swim-up » times for salmonid embryos. *Freshwater Biology*, 19, 41-48.
- Cushman R.M., 1985: Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. *North American Journal of Fisheries Management*, 5,330-339.
- Degiorgi F., Champagneulle A., 2000: Diagnose piscicole et mesure de l'efficacité des alevinages en truite sur le Doubs Franco-Helvétique. Rapport final Etude CSPINRA, 119 p.
- DIREN Bourgogne, 2005: Indices diatomiques et IBGN de la région Franche-Comté. Résultats 2004 et évolution sur cinq ans. Rapport Diren Bourgogne, cellule qualité des eaux, 54 p. et annexes.
- Druart, P. & Heger, T., 2010: La flore des Hautes-Côtes du Doubs franco-suisse. In Druart, Ph. et al. (éds) : Flores neuchâteloises au coeur de l'arc jurassien. Association Neuchâteloise Flore & Nature, La Chaux-de-Fonds, 217-229.
- Dumont, V: Etude des cyanobactéries dans la rivière Tarn. Campagne été 2005. Rapport 05150 VD 13, CRT-CRITT Bio-Industries, Toulouse, 108 p., et annexes.
- DVWK-Merkblatt 232, 1996: Fischaufstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle (DVWK 1996a).
- DWA THEMEN, April 2006: Funktionskontrolle von Fischaufstiegsanlagen Auswertung durchgeführter Untersuchungen und Diskussionsbeiträge für Durchführung und Bewertung.
- DWA-Arbeitsgruppe WW-8.1 2005: Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen, Hennef.
- EPTB, mai 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.
- Fisher S.G. & La Voy A., 1972: Differences in littoral fauna due to fluctuating water levels below a hydroelectric dam. *Journal of the Fishers Research Board of Canada*, 29,1472-1476.
- Fraley J., Marotz B., Decker-Hess J., Beattie W. & Zubik R., 1989: Mitigation, compensation and future protection for fish populations affected by hydropower development in the upper Columbia system, Montana, USA. *Regulated Rivers: Research & Management*, 3,3-18.
- Garcia de Jalon D., Montes C., Barcelo E., Casado C & Menes F., 1988 : Effects of hydroelectric scheme on fluvial ecosystems within the Spanish Pyrenees. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2,479-491.
- Gore J.A., Niemela S., Resh V. & Stanzner B., 1994: Near-substrate hydraulic conditions under artificial floods from peaking hydropower operation: a preliminary analysis of disturbance intensity and duration. *Regulated Rivers: Research and Management*, 9, 15-34.
- Haitai K. et G.-I. Hoshiai. 1994: Pathogenicity of *Saprolegnia parasitica* coker. In : *Salmon Saprolegniasis*. Edited by : G. J. Mueller. U.S. Department of Energy, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon. pp. 87-98.
- Heggenes J. & Traaen T., 1988: Downstream migration and critical water velocities in stream channels for fry of four salmonid species. *Journal of Fish Biology*,32, 717-727.
- Hicks B.J. & Jowett LG., 1992: Impacts of Flows Modified by Hydroelectricity Generation on Angling and Trout Productivity in the Hinemaiaia River. *New Zealand Freshwater Fisheries*, 107, 66 p.

- Holzner, M. (2000) : Untersuchungen über die Schädigung von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Dettelbach.- Dissertation Technische Universität München ; 351 S.
- Hurlimann, J., Elber, F., Niederberger, K., Straub, F., Stöckli, A. & Niederhauser, P., 2001: Historische Kieselalgenproben als biologische Referenzen zur Bewertung von Fliessgewässern des Schweizer Mittellandes - erste Ergebnisse. Studies on Diatoms, Lange-Bertalot-Festschrift, A.R.G. Ganter Verlag K.G., Ruggell, 401-415.
- Kirchhofer A., Breitenstein M., Zaugg B. 2007: Liste rouge poissons et cyclostomes. Office fédéral de l'environnement, Berne et Centre suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel. L'environnement pratique No 0734: 64 p.
- Küttel S., Armin P., Wüest A., 2002 Rhône Revitalisierung Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer Publikation Nummer 1
- Larinier M., Travade F., Porcher J.P., Gosset C. (1994) : Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. Conseil Supérieur de la Pêche .- 335 p.
- Larinier, M. & Travade, F. 1999 : La dévalaison des migrateurs : problèmes et dispositifs.- Bull. Fr. Pêche Piscic. 353/354 ; 181-210.
- Larinier, M. & F. Travade 2002: Downstream migration: problems and facilities. In: LARINIER, M., F. Travade & J.P. Porcher: Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl.; 181-205.
- Liebig H., Lim P., Belaud A., 1998 : Influence du débit de base et de la durée des éclusées sur la dérive d'alevins de truite commune : expérimentations en canal semi-naturel. Bull. Fr. Pêche Piscic. (1998) 350-351 : 337-347.
- Liess M, Schäfer R, Schriever C, 2008 : The footprint of pesticide stress in communities - species traits reveal community effects of toxicants. *Science of the Total Environment*, 406, 484-490.
- Lubini V. et al. 2012 : Rote Listen Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen. Gefährdete Arten der Schweiz, Stand 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern, und Schweizer Zentrum für die Kartographie der Fauna, Neuenburg. Umwelt-Vollzug Nr. 1112: 112 pp.
- Malavoi J.R. & Carrel G., 1986 : Impacts biologiques du fonctionnement par éclusées des ouvrages hydroélectriques de la rivière l'Ain: étude préliminaire. ARALEPBP, 35 p.
- Mez, K., Hanselmann, K. & Preisig, H. R., 1998: Environmental conditions in high mountain lakes containing toxic benthic cyanobacteria. *Hydrobiologia* 368 : 1-15.
- Ministerium für Umwelt- und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2005): Handbuch Querbauwerke, Aachen.
- Montandon, P.E., Mages, J.F. & Miserez, J.J., 1995: Etude de l'écoulement et de l'autoépuration du système karstique. Exemple de la vallée de la Ronde (Jura, Suisse). Bulletin d'Hydrogéologie 14 : 1-22.
- Montandon, P.-E., Gogniat, S., Rognon, P. & Miserez, J.-J., 1997: Nitrification dea eaux rejetées par la STEP de La Chaux-de-Fonds - Suisse - lors de leur passage dans le système karstique de la Ronde. Proc. 12th Int. Congress of Speleology 2, 229-234.
- Monten, E.; 1985: Fish and turbines. Stockholm, Norstedts Tryckeri; 109 S.

- Moog O., 1993: Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers: Research & Management*, 8,5-14.
- Neish, G.A. & Hughes, G.C., 1980: Fungal diseases of Fishes. S.F. Snieszko & Axelrod, H.R. (ed.) *Diseases of Fishes*, Book 6. T.F.H. Publ. Inc. Ltd. 159 pp.
- Neitzel D. A., R. A. Elston et C. S. Abernethy. 2004: DOE Report (Contract : DE-AC06-76RL01830). *Prévention of Prespawning Mortality : Cause of Salmon Headburns and Cranial Lesions*. pp. 1- B25.
- Nelson E. A., 1986: Effect of flow fluctuations on brown trout in the Beaverhead river, Montana. *North American Journal of Fisheries Management*, 6,551-559.
- OFEV 2011 : Liste des espèces prioritaires au niveau national. Espèces prioritaires pour la conservation au niveau national, état 2010. Office fédéral de l'environnement, Berne. *L'environnement pratique n° 1103*.
- Oldewage, W.H. & Van As, J.G., 1987. Parasites and winter mortalities of *Oreochromis mossambicus*. *South Afr. J. Wildl. Res.*, 17: 7-12.
- Pickering A. D. 1994. Factors which predispose salmonid fish to Saprolegniasis. Edited by G. J. Mueller. U.S. Department of Energy, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon. pp. 67-84.
- Poff N.L., 1992: Why disturbances can be predictable: a perspective on the definition of disturbance in streams. *Journal of North American Benthological Society*, 11, 86-92.
- Raben, K. v.; 1957a: Über Turbinen und ihre schädliche Wirkung auf Fische. *Zeitschrift für Fischerei und deren Hilfswissenschaften (Sonderdruck)*; 6; 1- 7; 12 S.
- Riegler K., 1985. Evaluation de l'importance de la fraye naturelle de la truite de rivière (*Salmo trutta* L.) dans les principales rivières du Canton de Neuchâtel. Diplôme de licence de sciences naturelles. Institut de zoologie de l'Université de Neuchâtel. 1 vol., 105 p.
- Roberts R. J. et C. J. Sheperd. 1997. *Handbook of trout and salmon diseases*, 3rd ed. Fishing News Books.
- Schager E., Peter, A., Burkhardt-Holm, P., (2007) Status of young-of-the year brown trout (*Salmo trutta fario*) in Swiss streams: factors influencing YOY trout recruitment. *Aquat. Sci.* 69 :41-50.
- Schmid Peter et al. 2010: Polychlorobiphényles (PCB) dans les eaux en Suisse. Données concernant la contamination des poissons et des eaux par les PCB et les dioxines: évaluation de la situation. *Connaissance de l'environnement n° 1002*. Office fédéral de l'environnement, Berne. 104 p.
- Straub, F., 2002 : Résultats d'analyses des diatomées épipéliques de sédiments littoraux du lac de Neuchâtel. Campagnes des 11. 6 et 24. 9. 2001 Etude d'impact de la STEP de Neuchâtel. Biol-Conseil SA, Neuchâtel, photocopié 8 p., 8 figs h.t. et 3 tableaux.
- Straub, F., 2003: L'autoépuration de La Ronde : efficacité comparée du cours aérien et du cours souterrain. Etude effectuée pour le Service de l'hygiène et de l'environnement, Ville de La Chaux-de-Fonds. Rapport du laboratoire d'algologie, 17 p.
- Straub, F., 2003: Examen des paquets de boue flottante à la surface de la retenue de la Goule (Doubs) prélevés le 4 juin 2003. Rapport pour le SHE. Laboratoire d'algologie, La Chaux-de-Fonds, 7 p.

- Straub, F., 2003: Eaux rouges à l'étang de Biaufond. Présomption d'une fleur d'eau à Dinoflagellé nu. Examen de l'échantillon SHE 03-1615 du 11. 8. 2003. Rapport pour le SHE. Laboratoire d'algologie, La Chaux-de-Fonds, 3 p.
- Straub, F., 2005: Programme rivières 2005. Bassin du Doubs. Examen des populations de diatomées (Bacillariophyceae) épilithiques de huit stations situées sur le Bied du Locle, La Rançonnière, La Ronde, l'étang de Biaufond et le Doubs : diagnostic de qualité d'eau en 2005 et comparaison avec l'état observé antérieurement. Rapport PhycoEco pour le Service cantonal de la protection de l'environnement (canton de Neuchâtel), 18 p.
- Straub, F., 2006: Ville de La Chaux-de-Fonds (Service des travaux publics). Plan général d'évacuation des eaux (PGEE) : qualité écomorphologique, visuelle et biologique des principaux effluents communaux. Rapport PhycoEco, 24 p. et 3 annexes.
- Straub, F., 2008: Diatomées épilithiques rhéophiles et qualité biologique de trois cours d'eau : Le Boiron, Le Forestay et le Longiron (canton de Vaud). Rapport PhycoEco pour le SESA, Lausanne, 28 p. et 3 annexes.
- Straub, F., 2009: Examen des populations de diatomées (Bacillariophyceae) épilithiques dans les cours d'eau du canton de Neuchâtel : diagnostic de l'état de santé biologique des eaux. Rapport PhycoEco pour le Service cantonal de la protection de l'environnement (canton de Neuchâtel), 18 p. et 4 annexes.
- Straub, F., 2010: Analyse des matières en suspension dans un échantillon d'eau brute provenant de la prise d'eau dans le lac de Moron (13 m de profondeur). Recherche d'éventuelles cyanobactéries (algues bleu vert) potentiellement toxiques. Rapport PhycoEco pour le Groupe-E, Fribourg, 2 p.
- Straub, F., 2011: Fleur d'eau du lac de Moron. Fin juin 2011: Résultats des analyses microscopiques des échantillons prélevés le 30. 06. 2011. Rapport PhycoEco pour le SENE, Peseux, 2 p.
- Straub, F., Pokorni, B, Miserez, J.-J. & Montandon, P.-E., 2004: Note algologique III. Nuisances algales dans le Jura suisse en 2003. Bull. Soc. Neuchât. Sc. Nat. 127, 57-67.
- Straub, F. & Jeannin, P.-Y., 2006: Efficacité autoépuration de tracés aérien et karstique d'un effluent de station d'épuration (La Ronde, Jura suisse) : valeur indicative des diatomées. Symbioses, nlle sér., 14, p. 35-41.
- Stucki P. 2010: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Macrozoobenthos – niveau R. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1026: 61 p.
- Taylor E.B., 1988: Water temperature and velocity as determinants. Of microhabitats of juvenile Chinook salmon and Coho salmon in a laboratory stream channel. Transactions of the American Fisheries Society, 117,22-28.
- Thomas, E. A., 1961: Wucherungen von Cyanophyceen an den Ufern des Zürichsees und deren Ursachen. Schweiz. Z. Hydrol., 23 (1), 225-235.
- Van West P. 2006: Saprolegnia parasitica, an oomycete pathogen with a fishy appetite : new challenges for an old problem. Mycologist 20 : pp. 99-104.
- Verneaux J. 1973 : Cours d'eau de Franche Comté – Essai de Biotypologie. Thèse de Doctorat, mémoire No 84. Falculté des Sciences de Besançon. CNRS 8823. 357pp.

Weisberg S.B., Janicki A.J., Gerritsen J. & Wüson H.T., (1990). Enhancement of benthic macroinvertebrates by minimum flow from a hydroelectric dam. *Regulated Rivers: Research & Management*, 5(265),265-277.

Zaugg B., Stucki P., Pedroli J.-C. & Kirchofer A., 2003: PISCES, Atlas. Fauna Helvetica 7, Centre Suisse de Cartographie de la Faune. Neuchâtel; 233 p.

Zaugg, C., Leutwiler, H., 1996 : Petites centrales hydroélectriques et écologie des eaux – Analyse de la situation. DIANE, 85 pp.

Zaugg, C., Pedroli J.-C., 1997 : Poissons et petites centrales hydrauliques - Solutions avantageuses de franchissement pour les poissons et la microfaune aquatique. DIANE, 111p.

Zaugg, C., 1997 : Vernetzung bei Kleinwasserkraftwerken. Biologisches Kontinuum der Gewässer erhalten - Untersuchungen über das Gewässerkontinuum für Fische und Kleinlebewesen. DIANE, 98p.

http://www.doubs.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/101104_point_info_Loue_cle7d8f81.pdf
(consulté les 07.12.2010, 19.01.2012).

13. ANNEXES

- 1 Règlement d'eau de 1969 et Accord cadre du 30 juin 2003 concernant l'amélioration des écosystèmes dans le Doubs franco-suisse par la gestion des débits d'eau permanents
- 2 Combe des Sarrasins : Eclusées – Liste des valeurs de débits retenues pour le calcul des amplitudes journalières
- 3 Présentation synthétique de l'essai de démodulation n°1 réalisé le 27/08/2010
- 4 Résultats écotoxicologiques de la chair des poissons du Doubs franco-suisse
- FS-1 Prélèvements récents d'algues, dont les résultats sont utilisés à titre de comparaison (réd. F. Straub)
- FS-2 Des échantillons historiques de diatomées prélevés en 1963 : une étude internationale du Doubs avortée (réd. F. Straub)
- FS-3 Les sources nauséabondes (réd. F. Straub)
- FS-4 Une étude des bactéries fécales et mésophiles dans le lac de Brenets (réd. F. Straub)
- FS-5 Diatomées et qualité des eaux de rivières : méthodes du bureau PhycoEco, édition de janvier 2012 (réd. F. Straub)
- FS-6 Résultats bruts des analyses de diatomées (réd. F. Straub)
- PS-1 Résultats IBCH : Listes faunistiques
- AQ-1 Conclusions du « groupe de travail binational pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques du Doubs franco-suisse » sur les actions à mettre en oeuvre dans le bassin versant du Doubs pour améliorer la qualité des eaux et le fonctionnement des milieux aquatiques

Recommandations aux autorités responsables

- AQ-2** Sous-commission technique de la pêche dans le Doubs franco-suisse :
Charte du Doubs : Préservons la truite du Doubs
- AQ-3** Opérations d'inventaires piscicoles sur le Doubs franco-suisse (25)
Septembre 2011

Cahier technique
- AQ-4** Pêches d'inventaire 2011 dans le Doubs franco-suisse (NE)
- AQ-5** Service de la consommation et des affaires vétérinaires (SCAV) : Rapport
d'analyse en toxines liées à des proliférations potentielles de
cyanobactéries
- AQ-6** Surmortalité de truites dans le Doubs frontière: Investigations du FIWI
effectuées sur un échantillon de truites du Doubs en janvier 2011. Rapport
final
- AQ-7** Assessment of host range and genetic variation / clonality of *Saprolegnia*
sp. pathogenic on the fish populations of the Doubs
- AQ-8** Note algologique III. Nuisances algales dans le Jura Suisse en 2003.

Fleur d'eau du lac de Moron. Fin juin 2011 : Résultats des analyses
microscopiques des échantillons prélevés le 30. 06. 2011
- AQ-9** Büttiker B., 2007 : Repeuplement des cours d'eau du Jura en truites.
Objectifs, stratégies, succès et effets indésirables.

Synthèse