

# **Modèle de flux polluants pour le bassin versant du lac de Morat**



## **Rapport technique**

Ecublens, le 6 septembre 2019

Canton de Fribourg  
Service de l'Environnement (SEn)

**HOLINGER SA**

Route de la Pierre 22, CH-1024 Ecublens

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

lausanne@holinger.com

Version	Date	Rédaction	Validation	Distribution
1.0	08.2018	SLE	MAT/SCJ	SEn, DGE, OFEV, Eawag
2.0	11.2018	SLE	MAT/SCJ	SEn, DGE
3.0	02.2019	SLE/SCJ	SCJ/MAT	SEn, DGE
4.0	07.2019	SLE	SCJ	SEn
5.0	09.2019	SLE	SCJ	SEn

P:\PROJETS EN COURS\A2136 Lac de Morat - Modélisation des flux polluifs\Administration\Rapports\A2136 RA Modèle de flux polluifs pour le bassin versant du Lac de Morat final 20190902.docx

## TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION, CONTEXTE	7
1.1	Description du bassin versant	7
1.2	Etat du lac de Morat	7
1.3	Périmètre d'étude	8
1.4	Objectifs de l'étude	10
1.5	Définitions	10
1.5.1	Sources ponctuelles	10
1.5.2	Sources diffuses	10
1.5.3	Phosphore total (Ptot)	11
1.5.4	Phosphore particulaire	11
1.5.5	Phosphore dissous (Pdis)	11
1.5.6	Phosphore inorganique dissous (PID)	11
1.5.7	Phosphore biodisponible	12
1.5.8	Ruissellement	12
1.5.9	Lessivage	12
1.5.10	Erosion	12
2	ÉTAT DES LIEUX	13
2.1	Etudes existantes	13
2.1.1	Rapport Eawag (2009) et état des connaissances (2018)	13
2.1.2	Autres études	14
2.2	Données disponibles	15
2.2.1	Données STEP	15
2.2.2	Débits mesurés par les stations hydrométriques	15
2.2.3	Données de suivi physico-chimique des cours d'eau	16
2.3	Données relevées dans le cadre de l'étude	18
2.3.1	Phosphore dissous	18
2.4	Apports de phosphore en fonction des débits mesurés	18
3	METHODOLOGIE	21
3.1	Objectifs du modèle	21
3.2	Structure du modèle	21
3.3	Bases du modèle	21
3.3.1	Conservation du phosphore	21
3.3.2	Rejets de STEP	22
3.3.3	Déversements des réseaux	22

3.3.4	Apports diffus	22
3.4	Calibration	24
3.4.1	Calcul des flux de phosphore dissous	24
3.4.2	Calibration des flux modélisés sur les flux calculés	24
3.5	Modifications pour le calcul de l'état futur	25
3.5.1	Croissance démographique	25
3.5.2	Régionalisations de STEP	25
3.5.3	Pourcentage d'eaux claires parasites (ECP)	26
3.5.4	Normes de rejet futures	26
3.5.5	Déversements des réseaux	27
4	RÉSULTATS POUR L'ÉTAT ACTUEL	28
4.1	Comparaison entre les flux de phosphore biodisponible modélisés et mesurés	28
4.2	Flux de phosphore biodisponible modélisé à l'état actuel	29
4.2.1	Flux total de phosphore biodisponible	29
4.2.2	Flux de phosphore biodisponible par sous bassin versant	30
4.2.3	Contribution des différentes voies d'apport de phosphore biodisponible par sous bassin versant	31
4.2.4	Sources des émissions de phosphore biodisponible diffus	33
4.3	Comparaison entre les flux de phosphore total modélisés et mesurés	39
4.4	Flux de phosphore total modélisé à l'état actuel	41
4.4.1	Flux de phosphore total	41
4.4.2	Flux de phosphore total par sous bassin versant	42
4.4.3	Contribution des différentes voies d'apport de phosphore total par sous bassin versant	43
4.5	Limites du modèle	45
5	RÉSULTATS POUR L'ÉTAT FUTUR ET EFFET DE MESURES POSSIBLES	46
5.1	Régionalisations et renforcement des normes en P <sub>tot</sub> sur les STEP	46
5.1.1	Flux total de phosphore biodisponible à l'état futur	46
5.1.2	Flux de phosphore biodisponible par sous bassin versant à l'état futur (2030) avec régionalisations et norme à 0.2 mg P/l	47
5.1.3	Contribution des différentes voies d'apport à l'état futur (2030)	48
5.1.4	Estimation des coûts des mesures	49
5.2	Mesures sur les apports diffus	50
5.2.1	Mesures prises dans les bassins versants du lac de Hallwil	50
5.2.2	Coûts des mesures de diminution des apports de phosphore vers le lac de Hallwil	52
5.3	Limites du modèle	52

6	CONCLUSIONS	54
7	RECOMMANDATIONS	56
7.1	Monitoring et suivi du phosphore dissous	56
7.2	Mesures en agriculture pour limiter les pertes diffuses	56
7.3	Traitement renforcé du phosphore sur les STEP régionales, planification régionale	57
7.4	Amélioration du suivi des déversements provenant des réseaux	58
7.5	Remise à jour de la valeur cible en phosphore pour le lac de Morat	58

## ANNEXES

- Annexe 1 Périmètre d'étude et découpage des sous bassins versants
- Annexe 2 Caractéristiques et flux des STEP du bassin versant
- Annexe 3 Carte des flux de phosphore dissous diffus par hectare

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

C	Carbone
DGE	Direction Générale de l'Environnement, Vaud
Eawag	Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau
ECP	Eaux claires parasites
EH	Equivalent-Habitant
LAgr	Loi fédérale sur l'agriculture
LEaux	Loi fédérale sur la protection des eaux
OEaux	Ordonnance fédérale sur la protection des eaux
OFEV	Office fédéral de l'environnement
P	Phosphore
Pdis	Phosphore dissous
PGEE	Plan Général d'Evacuation des Eaux
PID	Phosphore Inorganique Dissous
Ptot	Phosphore total
SAGri	Service de l'Agriculture, Fribourg
SAVI	Service de l'Agriculture et de la Viticulture, Vaud (nouvelle direction : DGAV)
SCRIS	Service Cantonal de recherche et d'information statistique, Vaud
SEn	Service de l'Environnement, Fribourg
SESA	Service des Eaux, des Sols et de l'Assainissement, Vaud
STEP	Station d'épuration
VHV	Veille Hydrologique Vaudoise

# 1 INTRODUCTION, CONTEXTE

## 1.1 Description du bassin versant

Le bassin versant hydrologique du lac de Morat s'étend sur 690 km<sup>2</sup> dans les cantons de Vaud, Fribourg et Berne. Il est exploité de façon intensive à des fins agricoles sur environ trois quarts de sa superficie et fortement influencé par les activités humaines. Le lac de Morat reçoit les eaux usées épurées d'environ 110'000 habitants, raccordés à 31 stations d'épuration.

Le lac a un volume d'environ 0,55 km<sup>3</sup> et l'eau présente un temps de séjour hydraulique théorique de 1,6 année, ce qui est faible en comparaison à d'autres lacs (3-4 ans pour les lacs de Hallwil et de Baldegg, 16 ans pour le lac de Sempach). Cela signifie que le lac réagit rapidement aux changements survenant dans le bassin versant.

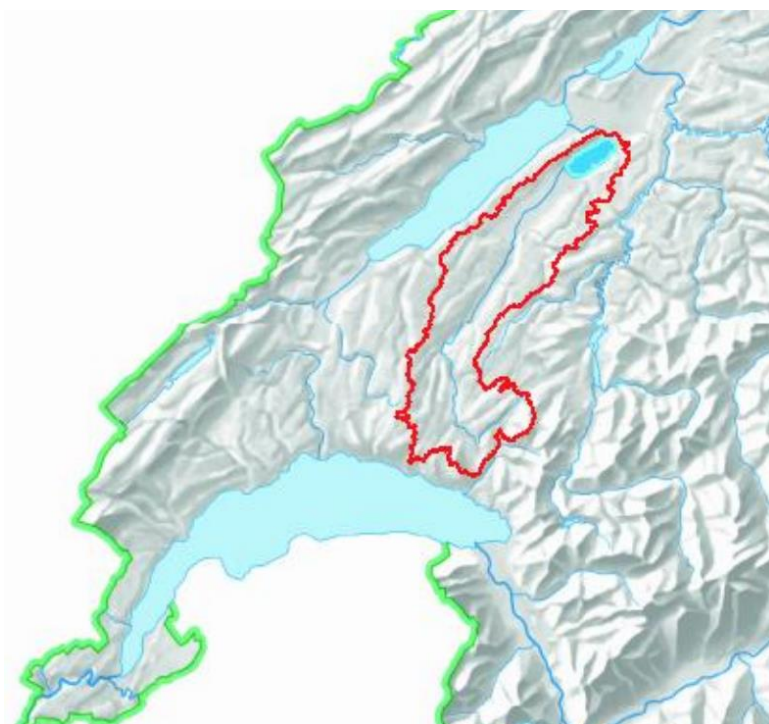


Figure 1 : Bassin versant du lac de Morat

## 1.2 Etat du lac de Morat

Historiquement, le lac de Morat a atteint des niveaux très élevés en phosphore (environ 150 µg / l P<sub>tot</sub> au début des années 1980).

Les mesures de réduction de la charge en phosphore dans le bassin versant du lac de Morat réalisées jusqu'à maintenant ont permis de réduire les apports en phosphore, mais elles n'ont pas suffi à ramener le lac à un état mésotrophe, à savoir un milieu dans lequel la disponibilité des nutriments est moyenne. Avec des concentrations moyennes de 20 µg/l, le lac de Morat est méso-eutrophe, ce qui signifie qu'il est encore enrichi en nutriments (Figure 2).

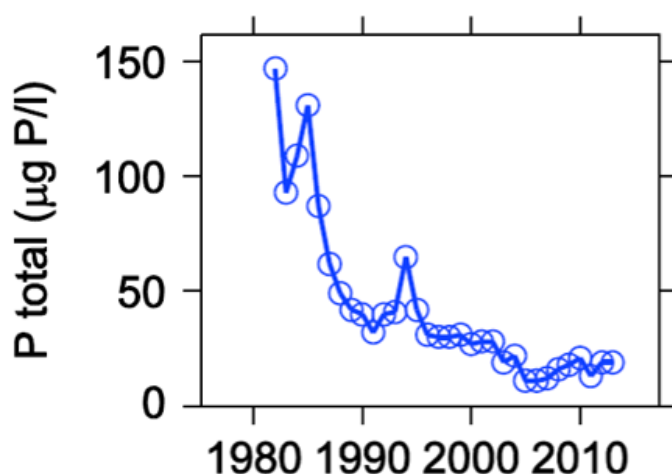


Figure 2 : Valeurs moyennes annuelles des concentrations en phosphore dans le lac de Morat (OFEV, 2016<sup>1</sup>)

La production et la biomasse algale sont encore trop élevées, le macrozoobenthos et les communautés de plantes aquatiques présentent toujours un statut mésoeutrophe, et la valeur cible légale exigée pour l'oxygène est rarement atteinte dans l'hypolimnion global. Selon une étude réalisée par l'Eawag, des mesures supplémentaires de diminution des apports dans le domaine de l'épuration des eaux usées et de l'agriculture doivent permettre de **réduire encore de 15 % les apports en phosphore inorganique dissous (PID)** afin de diminuer la production primaire et d'atteindre l'état méso-trophe souhaité<sup>2</sup>. Du fait de la courte durée de séjour de ses eaux, le lac de Morat peut réagir plus rapidement aux modifications des apports en phosphore que d'autres lacs.

### 1.3 Périmètre d'étude

La présente étude s'intéresse à l'entier du bassin versant hydrologique du lac de Morat qui s'étend sur les cantons de Fribourg, Vaud et Berne. Le périmètre a ensuite été découpé en sous bassins versants sur la base des bassins versants des futures stations d'épuration régionalisées, de la frontière cantonale, ainsi que des bassins versants hydrologiques avec leurs points de mesure. La présentation cartographique du périmètre se trouve dans la Figure 3 ci-après et en Annexe 1.

<sup>1</sup> OFEV, Le lac de Morat - Qualité de l'eau du lac, Notice de l'OFEV, 2016

<sup>2</sup> Müller, B., & Schmid, M., Bilans du phosphore et de l'oxygène dans le lac de Morat. Rapport Eawag pour les cantons de Fribourg (SEN) et de Vaud (SESA), 2009.



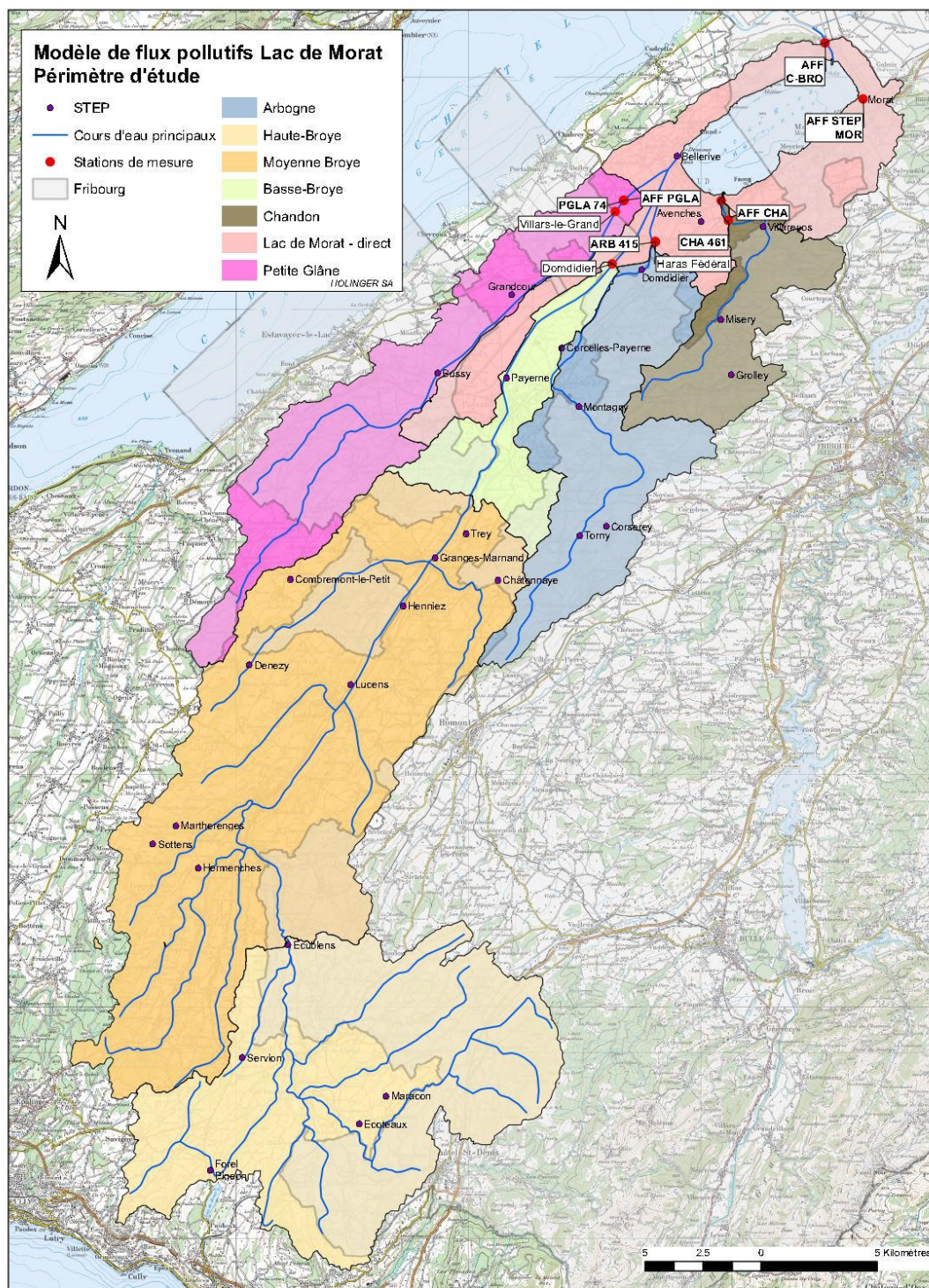


Figure 3 : Présentation cartographique du périmètre d'étude avec le découpage des sous bassins versants utilisés dans le cadre de cette étude.

## 1.4 Objectifs de l'étude

La présente étude vise à une meilleure compréhension et une quantification des différentes voies d'apport en phosphore et une quantification des effets de mesures de réduction des apports en phosphore possibles.

Un flux de phosphore total (P<sub>tot</sub>) et de phosphore biodisponible par sous bassin versant est calculé avec le modèle développé dans le cadre de cette étude. Ce modèle comprend le flux diffus et la somme des flux ponctuels (rejets de STEP et déversements des réseaux) compris dans le bassin versant en question. C'est le phosphore biodisponible qui est critique pour l'eutrophisation des lacs, ainsi seuls les résultats pour le phosphore biodisponible à l'état futur sont illustrés dans le présent rapport.

L'établissement d'un bilan des flux permettra ainsi d'atteindre les objectifs suivants :

- Faire un inventaire des intrants polluants dans le bassin versant pour le phosphore en tant que nutriment prioritaire pour le lac de Morat ;
- Quantifier les intrants et leurs proportions relatives ;
- Simuler et quantifier l'effet de possibles mesures sur les flux polluants, et en tirer des conclusions sur la pertinence de ces mesures ;
- Plus spécifiquement, cette étude doit servir comme base de décision pour fixer les exigences de rejet en phosphore total, a priori renforcées par rapport aux exigences usuelles de l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), qui seront imposées pour les projets d'extension et de rénovation des principales STEP du bassin versant ;
- Elle vise également à déterminer si des interventions sont nécessaires pour limiter les apports diffus et le cas échéant identifier des mesures possibles

## 1.5 Définitions

### 1.5.1 Sources ponctuelles

Les sources ponctuelles représentent les apports en polluants géographiquement localisables que sont par exemple les rejets des stations d'épuration (STEP), les rejets d'eau industrielle ou encore les surverses unitaires des réseaux d'assainissement tels que des déversoirs d'orage. Les sources ponctuelles sont ainsi directement liées à la gestion des eaux urbaines.

### 1.5.2 Sources diffuses

Les sources diffuses correspondent aux apports de polluants en provenance de surfaces étendues et non ponctuelles comme par exemple les apports en provenance de l'agriculture, les écoulements des surfaces bâties ou encore les écoulements en provenance des routes ou des voies ferrées. Ces apports dépendent généralement de facteurs tels que l'utilisation du sol, la géologie ou la topographie.

### 1.5.3 Phosphore total (P<sub>tot</sub>)

L'entier du phosphore : somme du phosphore dissous et particulaire. Les deux fractions peuvent être de nature organique ou inorganique. La Figure 4 ci-dessous illustre une répartition hypothétique entre les différentes fractions composant le phosphore total et décrites ci-après.

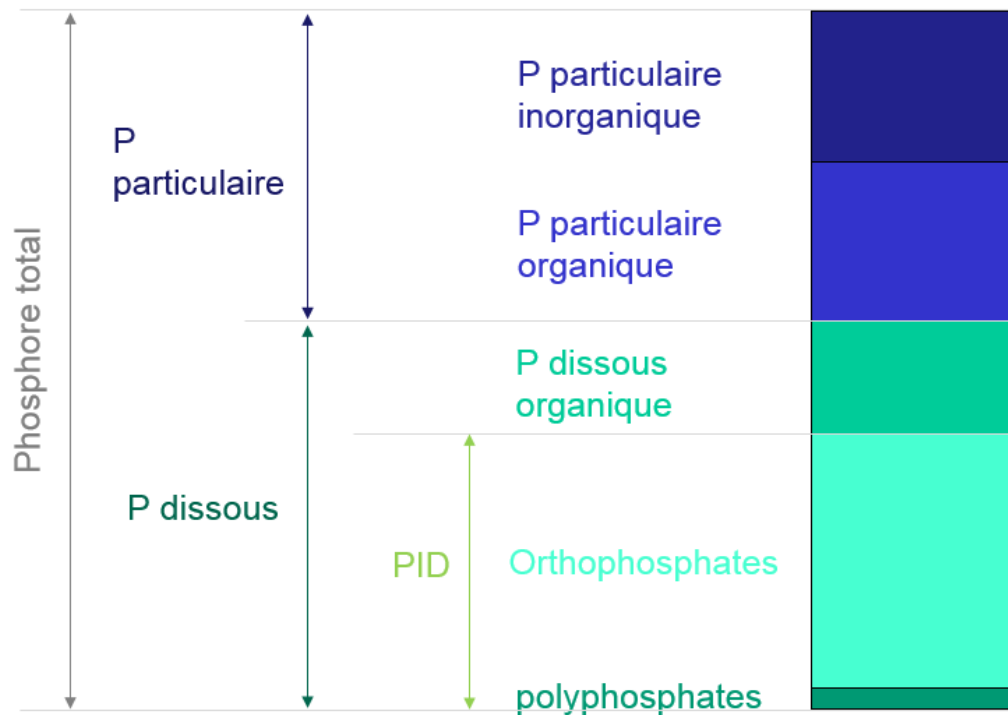


Figure 4 : Illustration hypothétique des différentes fractions composant le phosphore total. PID : phosphore inorganique dissous.

### 1.5.4 Phosphore particulaire

Le phosphore ne traversant pas un filtre de 0.45 µm. Il s'agit essentiellement de phosphore adsorbé/absorbé à des particules de sol ou contenu dans des minéraux ou de la biomasse. Le phosphore particulaire sédimente rapidement dans les lacs.

### 1.5.5 Phosphore dissous (P<sub>dis</sub>)

Le phosphore dissous est la fraction du phosphore traversant un filtre de 0.45 µm. Cette forme comprend à la fois les orthophosphates, les polyphosphates, le phosphore organique dissous et le phosphore contenu dans des particules d'un diamètre inférieur à 0.45 µm.

### 1.5.6 Phosphore inorganique dissous (PID)

C'est la fraction inorganique du P<sub>dis</sub>, composée très majoritairement des orthophosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) dans les milieux naturels.

### **1.5.7 Phosphore biodisponible**

C'est la fraction biodisponible de phosphore qui est critique pour le lac de Morat car c'est celle qui peut être absorbée et assimilée par les algues. Dans la présente étude, nous considérons que :

- Le phosphore dissous de sources diffuses est biodisponible tout comme le phosphore dissous dans les cours d'eau ;
- Le phosphore total de STEP (sources ponctuelles) est considéré comme biodisponible car il s'agit soit de phosphore inorganique, soit de bactéries qui sont biodisponibles.

### **1.5.8 Ruissellement<sup>3</sup>**

Il s'agit du transport d'éléments lié à l'écoulement des eaux à la surface des sols.

### **1.5.9 Lessivage<sup>4</sup>**

Il s'agit du transport d'éléments sous l'action de l'écoulement des eaux descendant (vers la nappe phréatique).

### **1.5.10 Erosion<sup>5</sup>**

Décollement et transport du sol ou de la roche par l'eau, le vent, la glace ou la gravité.

---

<sup>3</sup> Glossaire des termes de la science des sols

<sup>4</sup> Glossaire des termes de la science des sols

<sup>5</sup> Glossaire des termes de la science des sols

## 2 ÉTAT DES LIEUX

### 2.1 Etudes existantes

Les principales études existantes pertinentes pour ce projet sont brièvement listées et synthétisées ci-après.

#### 2.1.1 Rapport Eawag (2009)<sup>6</sup> et état des connaissances (2018)

Malgré des réductions importantes des apports de phosphore vers le lac de Morat au cours des dernières décennies, les concentrations en oxygène n'atteignent toujours pas la valeur légale de 4 mg/l dans les eaux profondes du lac de Morat. L'Eawag (B. Müller et M. Schmid) a donc été mandaté en 2009 pour réaliser une étude sur les causes de ces observations.

L'analyse des données de suivi des cours d'eau (Broye, Arbogne, Petite Glâne et Chandon) a révélé une baisse de l'ordre de 40% des flux de phosphore vers le lac de Morat entre 1986 et 2006, se situant lors de la réalisation de l'étude en moyenne à 60 t/an de P<sub>tot</sub> et 13 t/an de P<sub>ID</sub> (où PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> = P<sub>ID</sub>), considéré comme biodisponible, avec toutefois des variations annuelles importantes.

Des modèles de calcul ont révélé une charge limite en phosphore biodisponible de 11 t/an à atteindre pour que la concentration en O<sub>2</sub> ne descende plus en dessous de la valeur limite de l'OEaux de 4 mg/l. Avec des apports annuels moyens de 13 t/an, la charge limite est presque atteinte mais les efforts pour réduire les apports doivent être poursuivis. Cet objectif sera cependant difficile à atteindre car le bassin versant du lac de Morat est vaste (700 km<sup>2</sup>) comparé à celui d'autres lacs. De plus, une partie du déficit en O<sub>2</sub> est lié aux substances réduites accumulées dans les sédiments lorsque le lac était eutrophe et retardera donc les effets de la réduction des apports. La situation devrait toutefois commencer à s'améliorer si les apports annuels sont maintenus en dessous des 11 t/an plusieurs années de suite.

Les auteurs font état d'incertitudes sur les points suivants :

- L'estimation de la charge tolérable de phosphore est calculée sur la base d'un rapport de production de biomasse par phosphore biodisponible constant alors que les algues peuvent faire un usage plus efficace du P s'il est le facteur limitant la croissance et si les concentrations diminuent ;
- L'apport de phosphore biodisponible est peut-être sous-estimé.

Nous avons contacté l'un des auteurs (Beat Müller) du rapport au cours de l'année 2018 afin d'obtenir des précisions sur certains éléments du rapport. M. Müller a effectué dans l'intervalle des études similaires à celle du lac de Morat sur d'autres lacs suisses et pu nous apporter des informations sur l'avancée des connaissances au cours de cette décennie :

---

<sup>6</sup> Müller, B., & Schmid, M., Bilans du phosphore et de l'oxygène dans le lac de Morat. Rapport Eawag pour les cantons de Fribourg (SEN) et de Vaud (SESA), 2009.

- Le rapport de production de biomasse par phosphore biodisponible utilisé dans le rapport (C:P 166:1) est toujours considéré comme réaliste. Celui-ci varie cependant en fonction de la période de l'année et de la qualité trophique. Les lacs oligotrophes ont un ratio C:P de 200-300:1, ce qui confirme l'hypothèse citée précédemment selon laquelle les algues peuvent faire un usage plus efficace du phosphore lorsque les concentrations diminuent. Ceci implique que la production primaire restera encore élevée même si les apports en phosphore diminuent ;
- Le phosphore dissous dans les cours d'eau est considéré comme biodisponible et pas uniquement les orthophosphates. Cette fraction est plus importante que le PID : dans les affluents des lacs de Sempach et de Baldegg, le Pdis était 1.28 fois plus élevé que le PID. Le Pdis n'est toutefois pas mesuré dans le bassin versant du lac de Morat à l'heure actuelle ;
- La charge cible de 11 t/an se rapporte au phosphore biodisponible ;
- Les résultats de 2009 révélaient que la charge en PID seulement était de 13 t/an. Les apports en phosphore biodisponible sont toutefois plus élevés ;
- Tout le phosphore contenu dans les eaux usées épurées rejetées par les STEP est considéré comme biodisponible car il s'agit soit de phosphore inorganique, soit de bactéries qui sont biodisponibles.

### 2.1.2 Autres études

La notice de l'OFEV « **Le lac de Morat – qualité de l'eau du lac**<sup>7</sup> » décrit la formation du lac de Morat et les caractéristiques du lac et de son bassin versant. Il fait état de l'évolution historique des concentrations en phosphore dans le lac et des problèmes d'eutrophisation. Malgré de faibles concentrations en phosphore, la biomasse algale du lac de Morat n'a pas diminué et les conditions d'oxygénation n'ont été améliorées que de façon marginale. Sur la base de l'étude Eawag, les apports en phosphore vers le lac de Morat devraient être réduits de 15% par des mesures dans l'évacuation des eaux et d'extensification de l'agriculture pour atteindre l'état meso-eutrophe souhaité.

Le rapport d'Agridea « **Indicateurs pour diminuer l'apport de phosphore vers le lac de Morat**<sup>8</sup> » documente les informations existantes sur les apports en phosphore dans le domaine de l'agriculture et de l'assainissement urbain sous la forme d'indicateurs. Les indicateurs retenus dans le domaine de l'assainissement sont le rendement moyen d'élimination du Ptot et la concentration en Ptot en sortie de STEP ainsi que l'apport en Ptot par les effluents. L'occupation du sol, les animaux présents dans les communes, les risques d'érosion et la teneur en phosphore des sols ont quant à eux été pris en compte dans le domaine agricole. La compilation de ces indicateurs a permis l'identification de communes susceptibles de contribuer à l'apport de phos-

<sup>7</sup> OFEV, Le lac de Morat - Qualité de l'eau du lac, Notice de l'OFEV, 2016

<sup>8</sup> Agridea : S. Gassmann et P. Julien, Indicateurs pour l'apport de phosphore vers le lac de Morat, rapport rédigé pour les cantons de Fribourg (SEn et SAgri) et de Vaud (SESA et SAVI), 2011

phore de manière importante. Les interventions peuvent ainsi être ciblées et les mesures orientées là où elles auront une meilleure efficacité.

## 2.2 Données disponibles

### 2.2.1 Données STEP

Le SEn et la DGE effectuent régulièrement des mesures de Ptot en sortie de STEP. Les orthophosphates sont de plus mesurés en sortie des STEP vaudoises et des grandes STEP fribourgeoises. Seules les données de Ptot ont été utilisées dans le modèle car elles correspondent au phosphore biodisponible. Les flux ont été calculés sur la base des concentrations et des débits mesurés en sortie des STEP sur la période 2014-2016. Un nombre variable de mesures était disponible pour les différentes STEP. Une liste complète des STEP et de leurs caractéristiques et flux de Ptot rejetés se trouve en Annexe 2.

**Tableau 1 : Nombre de mesures de Ptot disponibles par an pour les différentes STEP du bassin versant du lac de Morat.**

Nombre de mesures par an	STEP
12-15	Avenches (2016), Bellerive, Châtonnaye, Combremont-le-Petit, Corcelles-près-Payerne, Corserey, Denezzy, Ecoteaux, Forel Chercottaz, Forel Pigeon, Grandcour (AGMV), Granges-Marnand, Henniez, Hermenches, Maracon, Martherenges, Misery, Savigny Pra Charbon, Servion, Sottens, Torny, Trey, Villarepos
24-30	Bussy (AIPG), Domdidier, Montagny, Payerne
>40	Avenches (2016), Ecublens (VOG), Grolley, Lucens (AIML), Morat

A noter que pour la STEP de Servion, le flux à l'état actuel a été calculé sur la base des mesures prises après l'extension de la STEP, à savoir entre septembre 2015 et fin 2017. Pour la comparaison entre les flux modélisés et mesurés, les données avant extension ont été prises en compte (2014 – août 2015).

### 2.2.2 Débits mesurés par les stations hydrométriques

Dans le périmètre d'étude, quatre stations hydrométriques mesurant les débits des différents cours d'eau sont présentes :

- Broye – Caserne d'aviation (OFEV) – station de mesure n° 2034
- Arbogne – ARB, Avenches (VHV<sup>9</sup>)

<sup>9</sup> Veille Hydrologique Vaudoise

- Chandon – CHS, Faoug (VHV)
- Petite Glâne – GLA, Villars-le-Grand (VHV)

La figure ci-dessous résume l'emplacement des stations hydrométriques présentes dans le périmètre d'étude.

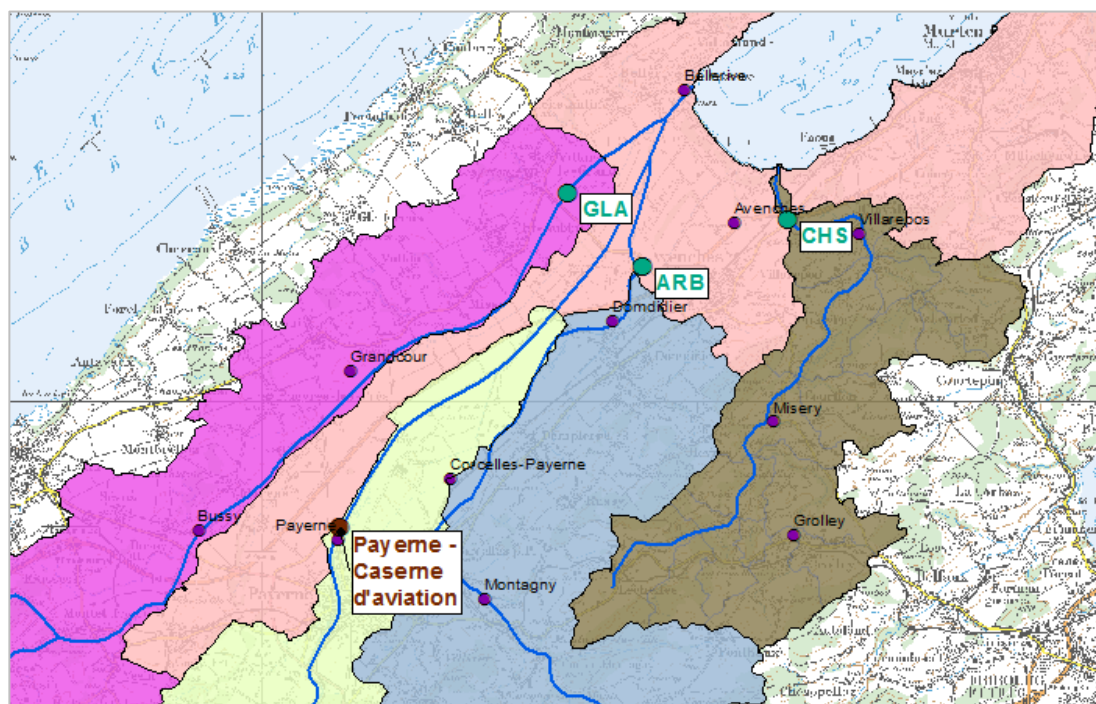


Figure 5 : Emplacement des stations hydrométriques de l'OFEV (brun) et de la VHV (vert).

A noter que la station du Chandon présente depuis 2012 des problèmes car la section est régulièrement perturbée par des dépôts. Les données de débits pour cette station sont donc en partie lacunaires.

### 2.2.3 Données de suivi physico-chimique des cours d'eau

Les services cantonaux de l'environnement (SEn et DGE) prélèvent régulièrement des échantillons dans les cours d'eau du bassin versant du lac de Morat afin d'évaluer la qualité physico-chimique de l'eau en différents endroits. Pour l'ensemble des stations, le Ptot et le PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> sont mesurés périodiquement. Le phosphore dissous n'est quant à lui pas mesuré (voir chapitre 2.3.1). Les points de mesures situés dans le périmètre d'étude et utilisés dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- Arbogne – Haras fédéral (SEn, DGE)
- Broye – Domdidier (DGE)
- Chandon – Faoug (SEn)
- Petite Glâne – Villars-le-Grand (SEn, DGE)

Les autres stations de mesures n'ont pas été retenues, car aucune donnée de débit ne pouvait être associée à ces mesures pour le calcul d'un flux (voir chapitre 2.2.2). Le flux annuel moyen a ensuite été calculé sur la base de la moyenne de toutes les



charges déterminées (débit horaire dans le cours d'eau lors de l'échantillonnage x concentration) basées sur des prélèvements instantanés. Le nombre de mesures par station et par année est présenté dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2 : Nombre de mesures et années ainsi que service cantonal effectuant les mesures pour les différents points de mesure.**

Cours d'eau	Nombre de mesures et années	Mesures prises par
	12 (2004 – 2005)	SEn
Arbogne – Haras fédéral	4 (2006 – 2016)	SEn
	2 (2007)	DGE
	14 (2011)	DGE
Broye – Domdidier	>50 (2013 – 2014) – PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	DGE
	>50 (2014 – 2015) – P <sub>tot</sub>	DGE
	36 (2016)	DGE
	25-30 (2011, 2013 (P <sub>tot</sub> ), 2017)	DGE
	19 (2012)	DGE
	10-13 (2006 – 2007)	DGE
	<5 (2009, 2010)	DGE
Chandon – Faoug	12 (2004 – 2005)	SEn
	4 (2006 – 2016)	SEn
Petite Glâne – Villars-le-Grand	12 (2004 – 2005)	SEn
	4 (2006 – 2016)	SEn
	2 (2007, 2011)	DGE

La Figure 6 illustre l'emplacement des différentes stations de mesures.

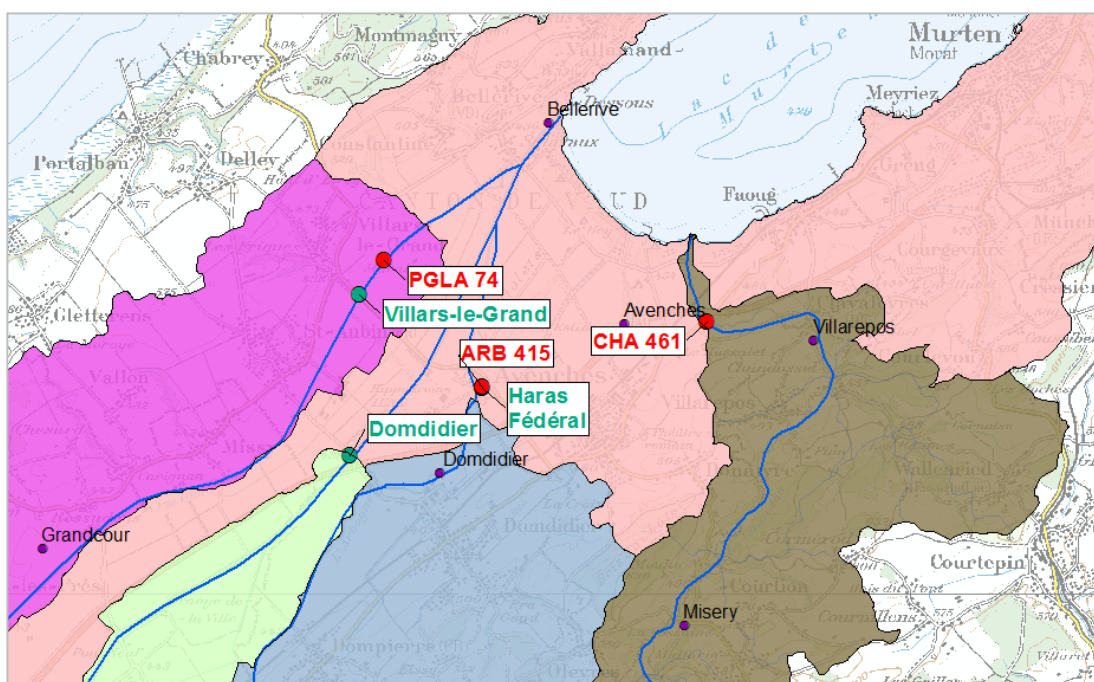


Figure 6 : Emplacement des stations de mesure de la qualité des eaux des cours d'eau du bassin versant du lac de Morat vaudoises (vert) et fribourgeoises (rouge).

## 2.3 Données relevées dans le cadre de l'étude

### 2.3.1 Phosphore dissous

Comme le phosphore dissous n'est pas quantifié dans le suivi physico-chimique usuel des cours d'eau (voir chapitre 2.2.3), l'analyse du phosphore dissous a été ajoutée aux paramètres habituellement mesurés par le SEn à partir du mois de mai 2018 afin d'obtenir des indications sur l'importance de cette fraction dans le bassin versant du lac de Morat. Des échantillons instantanés ont été prélevés aux points PGLA 74, ARB 415, CHA 461 et Broye – Domdidier (Figure 6) en mai et en août 2018 (2 analyses par cours d'eau).

## 2.4 Apports de phosphore en fonction des débits mesurés

Dans la Broye et la Petite Glâne, il ressort une tendance des concentrations en phosphore, aussi bien en Ptot qu'en  $\text{PO}_4^{3-}$ , à augmenter lorsque les débits deviennent plus importants. Contrairement à d'autres nutriments et polluants de sources ponctuelles, on n'observe pas de phénomène de dilution pour le phosphore. C'est l'inverse qui se produit, de nombreux processus à l'origine des émissions de phosphore dans les cours d'eau (lessivage, ruissellement, érosion et déversements unitaires) s'intensifiant lors de périodes de pluie. Cette relation ne s'observe cependant pas dans les autres cours d'eau, probablement en raison du relativement faible nombre d'analyses (et des problèmes de mesures de débit à la station du Chandon), notamment lors de périodes de hauts débits, et de différences dans la nature des bassins versants. Les figures ci-après illustrent cette relation pour la Broye.

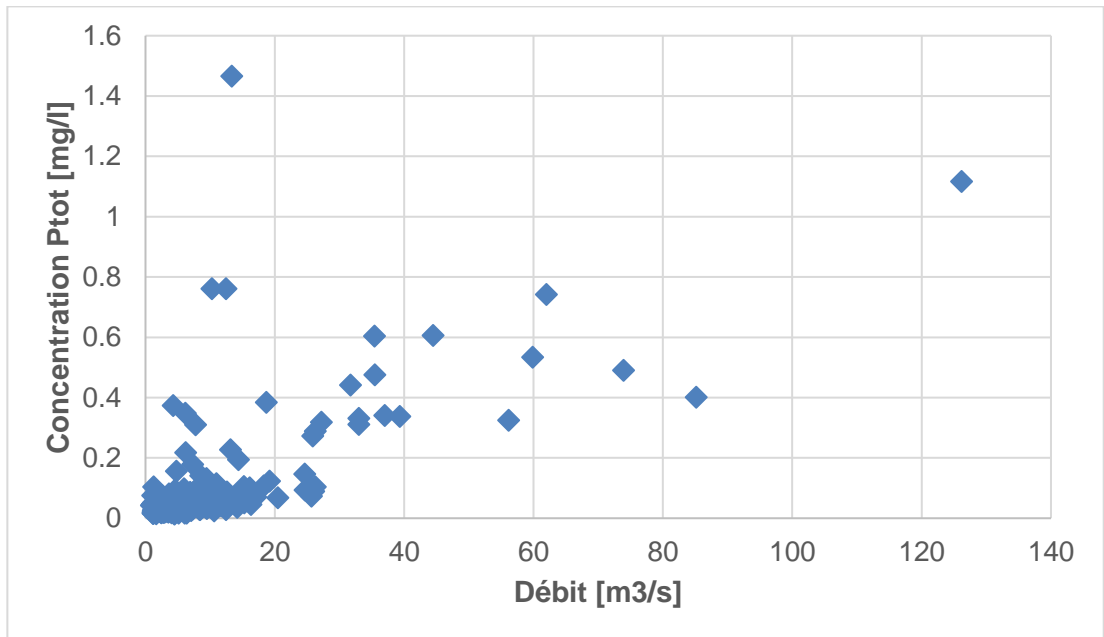


Figure 7 : Concentrations en Ptot mesurées dans la Broye en fonction du débit.

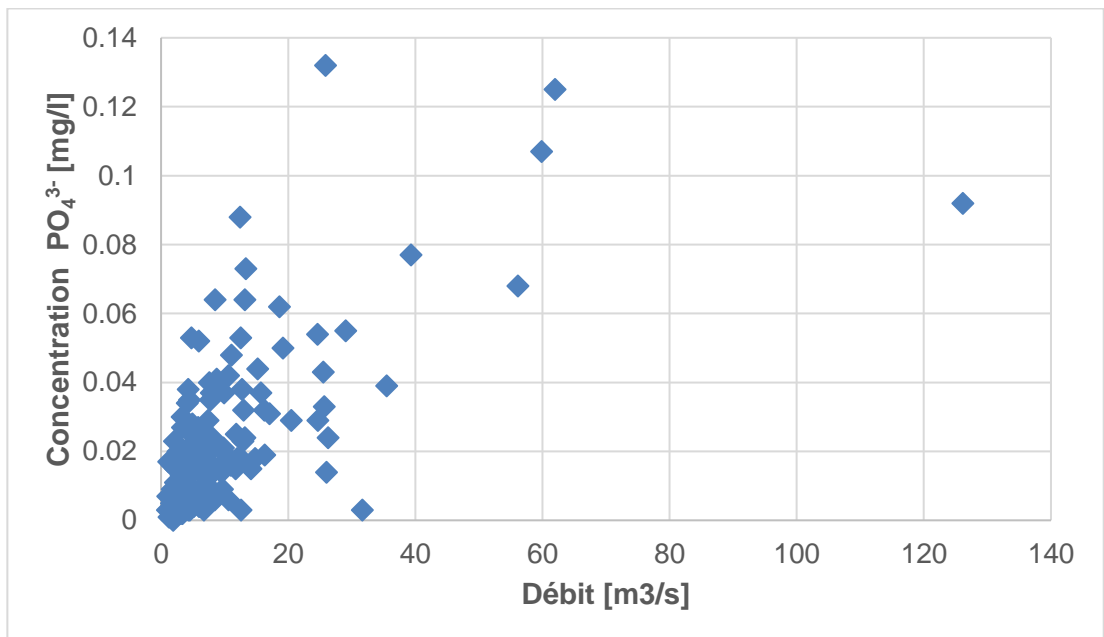


Figure 8 : Concentrations en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> mesurées dans la Broye en fonction du débit.

Sans surprise en raison de la relation exposée ci-dessus, les apports en phosphore (Ptot et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) augmentent de manière très importante lorsque les débits s'intensifient. Les deux figures ci-après illustrent à quel point les flux annuels sont influencés par les périodes de fortes pluies.

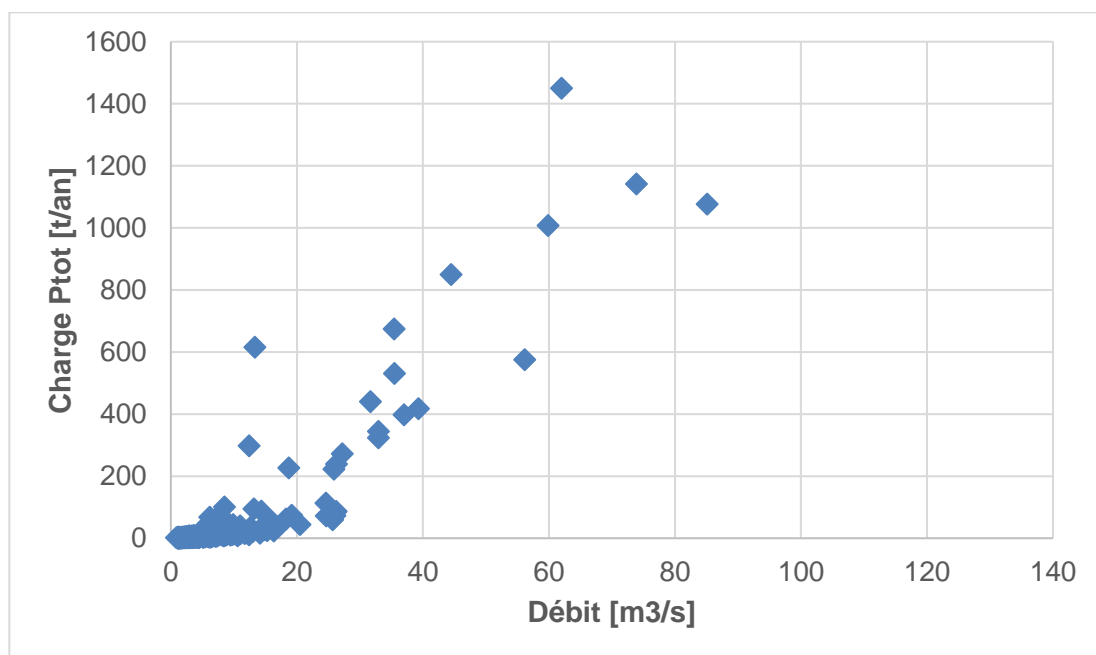


Figure 9 : Charge en Ptot dans la Broye en fonction du débit.

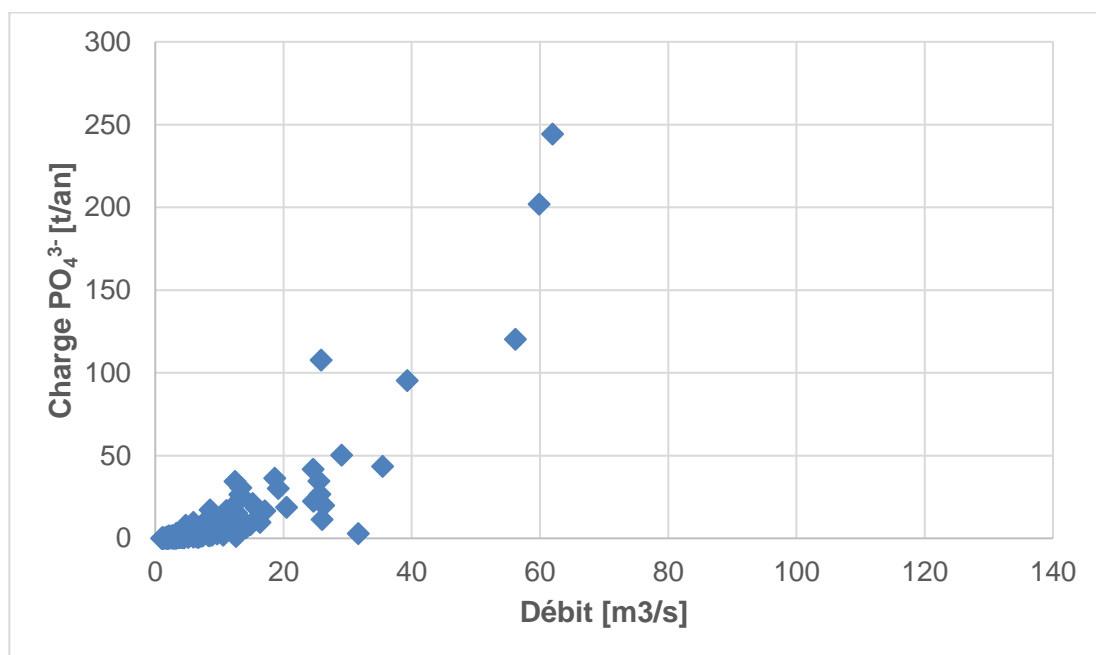


Figure 10 : Charge en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> dans la Broye en fonction du débit.

## **3 METHODOLOGIE**

### **3.1 Objectifs du modèle**

La création d'un modèle de bilan de flux a pour objectif de quantifier les différentes voies d'apport en phosphore et de déterminer les contributions respectives des différentes sources de polluants. La détermination des flux totaux cumulés permet d'avoir une indication sur l'ampleur des réductions nécessaires par rapport à la cible donnée pour atteindre un état meso-eutrophe dans le lac de Morat. De plus, un tel modèle permet de déterminer là où il y a lieu d'agir et de quantifier les effets de mesures possibles. Il permettra, de plus, de suivre l'effet de mesures prises dans le futur. Le modèle établi dans le cadre de cette étude se concentre sur les effets de mesures prises sur les STEP.

### **3.2 Structure du modèle**

Le modèle réalisé dans le cadre de cette étude permet de calculer les flux de phosphore (total et biodisponible) vers le lac de Morat en provenance du bassin versant par addition de tous les intrants le long du tronçon considéré. Les sources ponctuelles (STEP et déversements) sont ajoutées au modèle individuellement et de manière linéaire le long des différents cours d'eau en fonction de leur entrée connue sur ces derniers (pour les déversements : ajout des charges déversées liées aux EH au même endroit que la STEP respective). Les sources diffuses, quant à elles, sont ajoutées au niveau des points bas des sous bassins versants définis (voir chapitre 1.3). Les flux des sources diffuses correspondent donc aux apports provenant de la partie du périmètre située en amont de chaque point bas.

Pour permettre une comparaison entre les flux mesurés et les flux modélisés, les quatre stations hydrométriques situées sur les différents cours d'eau ont été choisies afin de délimiter quatre segments distincts. Les débits mesurés aux stations hydrométriques [ $m^3/s$ ] permettent de passer de concentrations [ $mg/l$ ] en flux [ $kg/an$ ] et ainsi de comparer les valeurs modélisées aux valeurs mesurées.

### **3.3 Bases du modèle**

#### **3.3.1 Conservation du phosphore**

Aucune transformation ou sédimentation du phosphore dans les cours d'eau n'est prise en compte dans le modèle. La non-prise en compte de tels processus s'explique pour des raisons pratiques et de simplicité et par l'absence de données permettant une évaluation adéquate. La sédimentation ne devrait cependant pas être d'importance dans les cours d'eau du bassin versant du lac de Morat, en l'absence de lacs, retenues et zones alluviales. Une transformation du phosphore peut avoir lieu dans les cours d'eau mais en raison des faibles temps de séjour dans ces derniers, celle-ci est négligeable.

### 3.3.2 Rejets de STEP

Les données des 31 STEP du bassin versant ont été analysées pour estimer un flux annuel moyen en P<sub>tot</sub> et en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> en sortie de chaque STEP. Le flux correspond à la moyenne des flux mesurés (débits mesurés x concentrations mesurées en sortie de STEP). Tout le phosphore (le P<sub>tot</sub>) est considéré comme biodisponible. Le nombre de mesures disponibles pour chaque STEP est variable mais les grandes STEP apportant le flux le plus important sont aussi les STEP pour lesquelles le plus grand nombre de données est disponible. L'incertitude sur le flux annuel moyen ainsi déterminé est donc relativement faible.

### 3.3.3 Déversements des réseaux

En raison du manque de données sur les surverses unitaires et les volumes déversés, une évaluation précise des déversements n'est pas possible. Une estimation d'une charge de P<sub>tot</sub> déversée par Equivalent-Habitant (EH) sur la base de résultats de simulations longue durée effectuées sur d'autres bassins versants a finalement été effectuée pour approximer les flux déversés par les réseaux. Ici aussi, tout le phosphore est considéré comme biodisponible.

Les résultats des simulations retenues sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3 : Estimation d'une charge moyenne en P<sub>tot</sub> déversée par EH et par an par les réseaux (réseaux unitaires) sur la base des résultats de simulations longue durée sur les bassins versants du lac de Lugano et du lac de Hallwil.**

Bassin versant	EH dans le bassin versant	Charge P <sub>tot</sub> déversée [kg/an]	Charge/EH [g/EH/an]
Lac de Lugano <sup>10</sup>	118'000	810	6.86
Lac de Hallwil <sup>11</sup>	11'700	85	7.26
<b>Moyenne prise en compte</b>			<b>7</b>

Une charge moyenne annuelle par EH de 7 g/an a ainsi été retenue pour le calcul des flux provenant des déversements des réseaux. Une charge en P<sub>tot</sub> provenant des réseaux par STEP a été calculée en fonction du nombre d'EH dénombrés sur chacune des STEP puis ces flux ont été ajoutés au modèle au même endroit que les rejets de STEP.

### 3.3.4 Apports diffus

Les flux polluants diffus sont estimés avec le modèle MODIFFUS 3.0 qui a été développé par l'Agroscope (le centre de compétences de la Confédération pour la recherche agricole) (J. Hürdler, V. Prasuhn, E. Spiess)<sup>12</sup> sur mandat de l'OFEV. Ce

<sup>10</sup> PGEE régional du CDALED (Consorzio Depurazione Acque Lugano e Dintorni), 2016

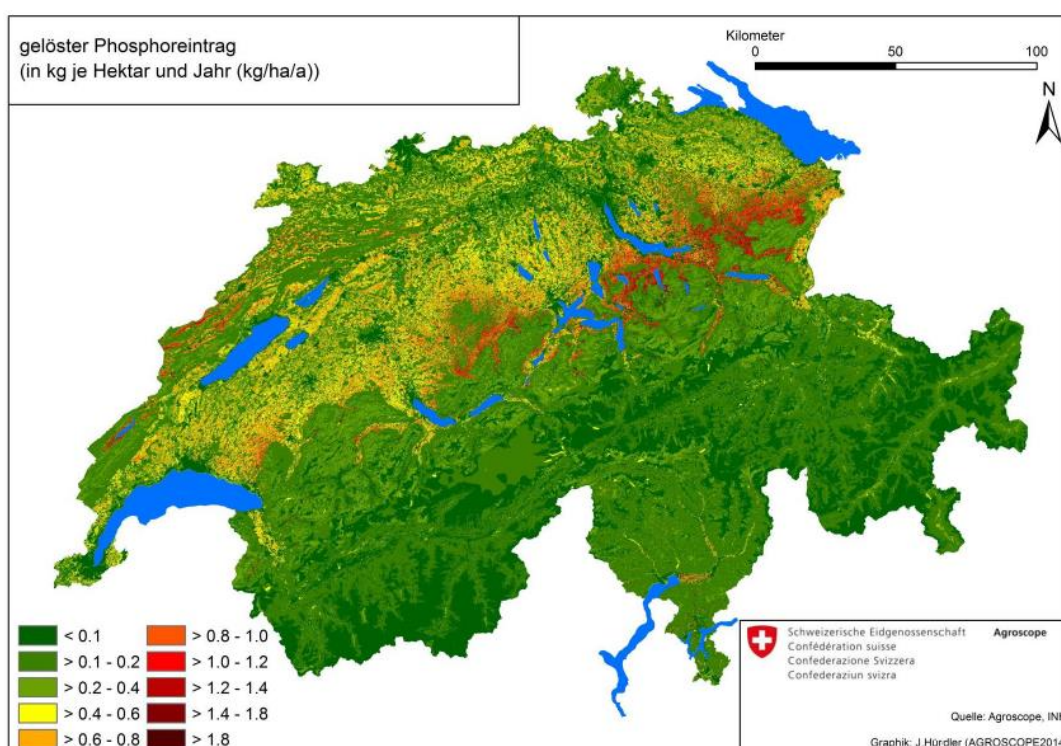
<sup>11</sup> Rapport technique du bureau KOST+PARTNER, Teilaktualisierung VGEP ARA Hitzkirchertal Entlastungskonzept, 2014

<sup>12</sup> Données provenant de: Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E., Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. rapport Agroscope réalisé sur mandat de l'OFEV, 2015

modèle permet de calculer les flux d'azote et de phosphore en provenance de sources diffuses (écoulements de surface, érosion, lessivage) dans les cours d'eau.

Il s'agit d'un modèle statistique-empirique d'émissions, qui est basé sur de nombreuses informations spatiales relatives à la couverture du sol et l'utilisation du territoire combinées à des coefficients spécifiques à l'utilisation des terres pour les pertes d'éléments nutritifs. Sur la base de mesures de terrain, de recherches de littérature et d'évaluations d'experts, les flux de substances sont quantifiés. Les flux de phosphore total et de phosphore dissous sont modélisés à l'aide de MODIFFUS.

L'Agroscope a quantifié sous mandat de l'OFEV les flux diffus d'azote et de phosphore pour tout le territoire suisse (Figure 11). Ces données ont été utilisées pour la présente modélisation.



**Figure 11 : Apports diffus de phosphore dissous pour tout le territoire suisse (en kg/ha/an). Extrait de Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E., *Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. rapport Agroscope réalisé sur mandat de l'OFEV, 2015***

Les flux de phosphore total et de phosphore dissous sont quantifiés. La distinction entre phosphore dissous et particulaire est faite de la manière suivante : tous les apports provenant du ruissellement, du lessivage, des drainages, de la déposition sur les eaux de surface et des apports directs de l'agriculture ainsi que 50% des apports directs diffus non agricoles (qui regroupe les apports directs de feuilles mortes, de paille, ... ainsi que les apports liés à la baignade et à l'utilisation d'engrais et d'aliments pour poissons et oiseaux d'eau) sont assimilés à du phosphore dissous alors que tous les apports provenant de l'érosion et 50% des apports directs diffus non agricoles sont considérés comme du phosphore particulaire et donc non biodisponible.

Dans le modèle MODIFFUS, tout comme dans cette étude, tout le phosphore dissous

est considéré comme biodisponible.

### 3.4 Calibration

#### 3.4.1 Calcul des flux de phosphore dissous

Comme seulement deux mesures de phosphore dissous étaient disponibles pour la modélisation, il n'était pas possible de calculer un flux de phosphore biodisponible représentatif. Il a été jugé plus adéquat d'utiliser cette mesure pour déterminer un facteur P dissous/orthophosphates (Pdis/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) pour les différents cours d'eau. Comme les flux annuels moyens d'orthophosphates peuvent être déterminés, il est ensuite possible de faire une estimation des flux de phosphore dissous sur la base des flux de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et du facteur Pdis/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> de la manière suivante :

$$Flux\ Pdis = f \frac{Pdis}{PO43-} * Flux\ PO43-$$

Les facteurs calculés et retenus pour la détermination des flux de phosphore dissous pour les différents cours d'eau sont synthétisés dans le tableau qui suit :

**Tableau 4 : Facteurs Pdis / PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> retenus pour les différents cours d'eau**

Cours d'eau	Facteur Pdis / PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Arbogne	1.25
Broye	1.18
Chandon	1.26
Petite Glâne	1.21

Les valeurs d'orthophosphates déterminées pour la Broye étaient en dessous de la limite de quantification. Il n'était donc pas possible de déterminer un facteur représentatif pour la Broye sur la base de ces mesures. Le facteur pour la Broye a donc été déterminé sur la base de mesures de phosphore dissous effectuées entre 2000 et 2005. Une fraction Pdis/Ptot a été calculée sur ces mesures et mise en relation avec la fraction PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/Ptot observée entre 2006 et 2016 afin d'obtenir un facteur Pdis/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

Ces facteurs sont comparables à ce qui a pu être observé dans d'autres lacs suisses, comme par exemple dans le lac de Sempach ou celui de Baldegg (voir chapitre 2.1.1). Il sera important de valider ces facteurs lorsqu'un nombre plus important de mesures sera disponible.

#### 3.4.2 Calibration des flux modélisés sur les flux calculés

Les flux modélisés ont été comparés aux flux mesurés afin de valider et de calibrer le modèle. Pour la calibration du modèle, les flux de phosphore dissous calculés (voir chapitre 3.4.1) ont été utilisés. Afin d'obtenir un flux regroupant la somme de tous les



apports, les apports liés à la déposition directement dans le lac (estimés par MODIFFUS) ainsi que la partie du bassin versant qui n'est pas prise en compte par les stations de mesure (Lac de Morat – direct : 71 km<sup>2</sup>), soit parce qu'elle se déverse directement dans le lac de Morat soit parce qu'elle se déverse à l'aval des points de mesure (voir Figure 6 : emplacement des stations de mesure), a été ajoutée au flux. Pour ce faire, les flux en sortie de STEP, liés aux réseaux et modélisés par MODIFFUS ont été ajoutés au total. A noter qu'une correction a été appliquée au flux diffus de MODIFFUS correspondant à la moyenne de la différence entre les flux diffus modélisés et calculés sur la base des mesures sur les autres sous bassins versants. Ce sous bassin versant ajoute ainsi un peu plus de 10% de phosphore biodisponible à la charge totale.

### **3.5 Modifications pour le calcul de l'état futur**

#### **3.5.1 Croissance démographique**

La projection de population haute du SCRIS<sup>13</sup> pour la région Broye-Vully a été retenue pour la modélisation de l'état futur, soit un taux de croissance de 1.6% par an. Ce même taux a été appliqué aux EH industriels.

#### **3.5.2 Régionalisations de STEP**

Le futur de l'épuration des eaux usées dans le bassin versant de la Broye a été défini dans le cadre des deux planifications cantonales pour le traitement des micropolluants. Quatre installations régionales traitant à terme les micropolluants devraient voir le jour le long de la Broye : une dans la Haute Broye (VOG Ecublens), une dans la Moyenne Broye (Lucens), une dans la Basse Broye (Payerne) et une dans la région d'Avenches (Basse Broye – Vully). L'objectif étant de raccorder à terme un maximum de STEP existantes sur ces quatre installations, afin d'augmenter l'efficacité globale de traitement, l'élimination des micropolluants et de réduire les coûts d'exploitation. En effet, dans leur planification pour l'évacuation et l'épuration des eaux, les cantons de Vaud et Fribourg se sont fixés comme objectif de privilégier les solutions régionales plutôt que locales. Dans ce contexte, les STEP de faible capacité devraient être supprimées à moyen terme, par soucis d'économie.

Certains projets de régionalisation conduisent cependant à une augmentation du nombre d'habitants raccordés sur le bassin versant du lac de Morat. Ainsi, la STEP de Kerzers, qui rejette actuellement ses eaux usées épurées dans le Grand Canal, se déversant ensuite directement dans le canal de la Broye, sera raccordée sur celle de Morat, qui sera agrandie et équipée d'un traitement des micropolluants. Ce sont ainsi les eaux usées épurées de quelques 9'000 habitants et 30'000 EH supplémentaires qui seront déversées dans le lac de Morat. Dans les périmètres Basse Broye – Vully et Payerne, quatre autres STEP (Chevroux, Delley-Portalban, Chabrey et Cudrefin (4'305 habitants, 5'143 EH)) devraient être ajoutées au bassin versant.

---

<sup>13</sup> SCRIS : Service cantonal de recherche et d'informations statistiques (canton de Vaud)

Ainsi, les périmètres de régionalisation (état des études au printemps 2018) considérés dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- Haute-Broye / VOG : STEP d'Ecublens (VOG), STEP d'Ecoteaux, STEP de Maraçon
- Moyenne Broye: STEP de Lucens (AIML) (y c. STEP de Vulliens (SIEMV) et STEP de Ropraz raccordées sur la STEP de Lucens au printemps 2017), STEP d'Henniez, STEP d'Hermenches, STEP de Granges-Marnand, STEP de Châtonnaye, STEP de Combremont-le-Petit, STEP de Trey
- Pôle Payerne : STEP de Payerne, STEP de Corcelles-près-Payerne, STEP de Bussy (AIPG), STEP de Grandcour (AGMV), STEP de Torny, STEP de Corserey, STEP de Montagny, STEP de Chevroux
- Basse Broye – Vully : STEP d'Avenches, STEP de Domdidier, STEP de Bellerive, STEP de Villarepos, STEP de Chabrey, STEP de Cudrefin, STEP de Delley-Portalban, STEP de Misery, STEP de Grolley
- Morat : STEP de Morat, STEP de Kerzers

A l'état actuel des études, 7 STEP vaudoises (Forel Chercottaz, Savigny Pra Charbon, Forel Pigeon, Servion, Sottens, Martherenges et Denezy) ne sont pas concernées par ces projets de régionalisation et devraient être maintenues à leur emplacement actuel.

### 3.5.3 Pourcentage d'eaux claires parasites (ECP)

Un pourcentage d'eaux claires parasites moyen de 30% pour la région a été pris en compte pour les calculs (VOG : 20%, Moyenne-Broye : 15%, Payerne : 58%, BBV : 40%). Ce pourcentage a été utilisé pour déterminer un débit d'eaux usées par EH (122 l/EH supplémentaire/j en moyenne), auquel le taux de croissance a été appliqué.

### 3.5.4 Normes de rejet futures

Pour la STEP de Morat, qui sera équipée d'une filtration sur sable, une concentration moyenne de rejet en P<sub>tot</sub> de 0.1 mg/l est attendue avec la mise en service de la nouvelle STEP. C'est donc sur cette valeur que se base le modèle pour l'état futur.

Pour les autres futures STEP régionales, la réduction amenée par la fixation de différentes normes de rejet est modélisée. Les normes et concentrations de rejet respectives suivantes ont été retenues pour le modèle :

**Tableau 5 : Concentrations moyennes de rejet pour différentes normes de rejet. Pour la norme à 0.3, le résultat se base sur les concentrations mesurées à la STEP de Hitzkirchertal, pour la norme à 0.2, sur les concentrations mesurées à la STEP de Lugano.**

Norme de rejet [mg P/l]	Concentration moyenne de rejet [mg P/l]
0.5	0.4
0.3	0.23
0.2	0.15

Pour les STEP maintenues et non régionalisées, il est admis qu'une norme de rejet à 0.5 mg/l sera exigée.

### **3.5.5 Déversements des réseaux**

Les déversements à l'état futur sont calculés sur la base du nombre d'EH à l'état futur avec la même charge moyenne déversée par EH. Pour les projets de régionalisation, les déversements actuels sont maintenus à l'emplacement de la STEP d'origine.

## 4 RÉSULTATS POUR L'ÉTAT ACTUEL

### 4.1 Comparaison entre les flux de phosphore biodisponible modélisés et mesurés

Les résultats montrent que la différence entre les flux modélisés et les flux mesurés est conséquente (Figure 12). Les flux modélisés sont systématiquement plus élevés que les flux mesurés, l'écart variant entre 30% (Petite Glâne) à plus de 100% (Broye). Il est difficile d'expliquer pourquoi l'adéquation entre MODIFFUS et les mesures est plutôt bonne par exemple pour la Petite Glâne alors qu'elle est mauvaise pour la Broye. Les bassins versants présentent en effet des caractéristiques relativement similaires à part la Haute-Broye qui est dominée par les Préalpes sur sa partie la plus à l'Est. Comme MODIFFUS est un modèle d'émissions, celui-ci tend de manière générale à surestimer les flux à l'échelle de bassins versants car les processus de transformation et de rétention, l'infiltration et l'exfiltration ainsi que les prélèvements d'eau peuvent modifier les flux parvenant finalement dans les lacs. La Broye présente toutefois un écart particulièrement important et la particularité d'avoir un flux en phosphore très largement particulaire, la fraction dissoute ne représentant que 21% du total alors que dans les autres cours d'eau, cette même fraction constitue 55-60% du flux total. L'origine de cet écart reste pour l'heure indéterminée (voir chapitre 4.3 également). En raison du nombre relativement important de mesures sur les cours d'eau et de la faible variation des facteurs  $P_{dis}/PO_4^{3-}$ , les flux mesurés sont considérés comme fiables et les flux modélisés ont en conséquence été calibrés sur les flux mesurés.

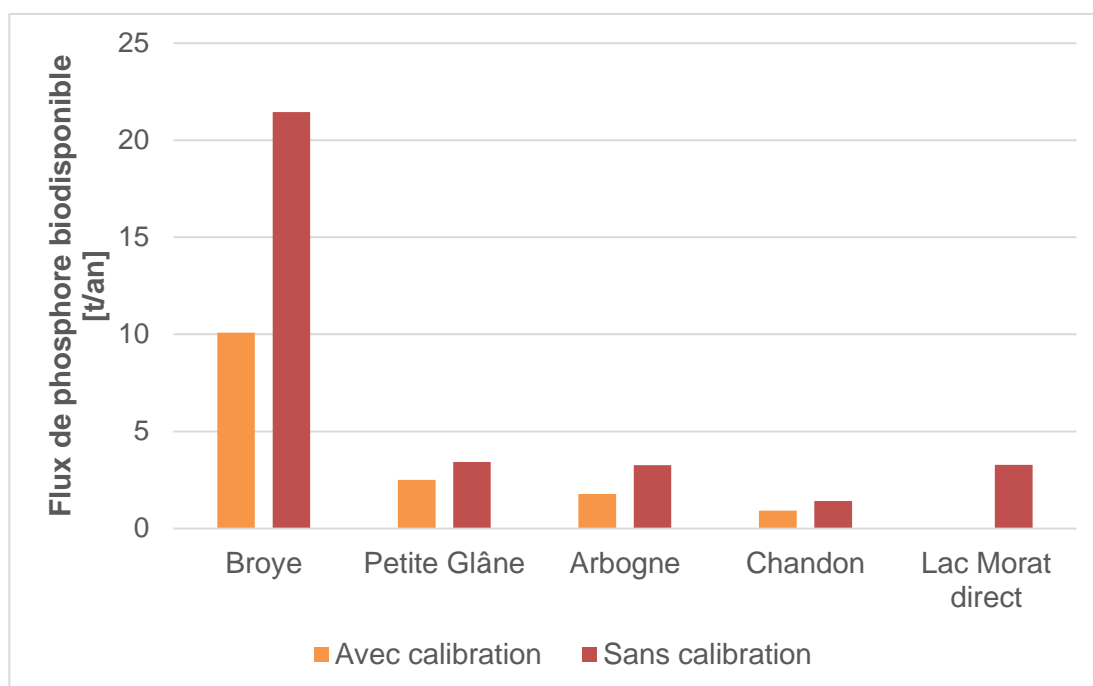


Figure 12 : Comparaison des flux de P biodisponible avec calibration et sans calibration. L'écart est de 30% pour la Petite Glâne, 70% pour le Chandon, 90% pour l'Arbogne et 110% pour la Broye.

## 4.2 Flux de phosphore biodisponible modélisé à l'état actuel

### 4.2.1 Flux total de phosphore biodisponible

Le flux modélisé après calibration se monte à 18 tonnes de phosphore biodisponible par an dont 60% sont d'origine diffuse (Figure 13). La partie ponctuelle se répartit entre les rejets en sortie de STEP (28%) et les rejets liés aux déversements des réseaux (7%). Un apport direct de phosphore dans le lac de Morat de 830 kg/an par les pluies et la déposition atmosphérique s'ajoute à la somme des flux ponctuel et diffus. Le flux total dépasse l'objectif des 11 t/an formulé par l'Eawag (Müller et Schmid, 2009) (voir chapitre 2.1.1). La fraction diffuse s'élève à elle-seule à environ 11 t/an.

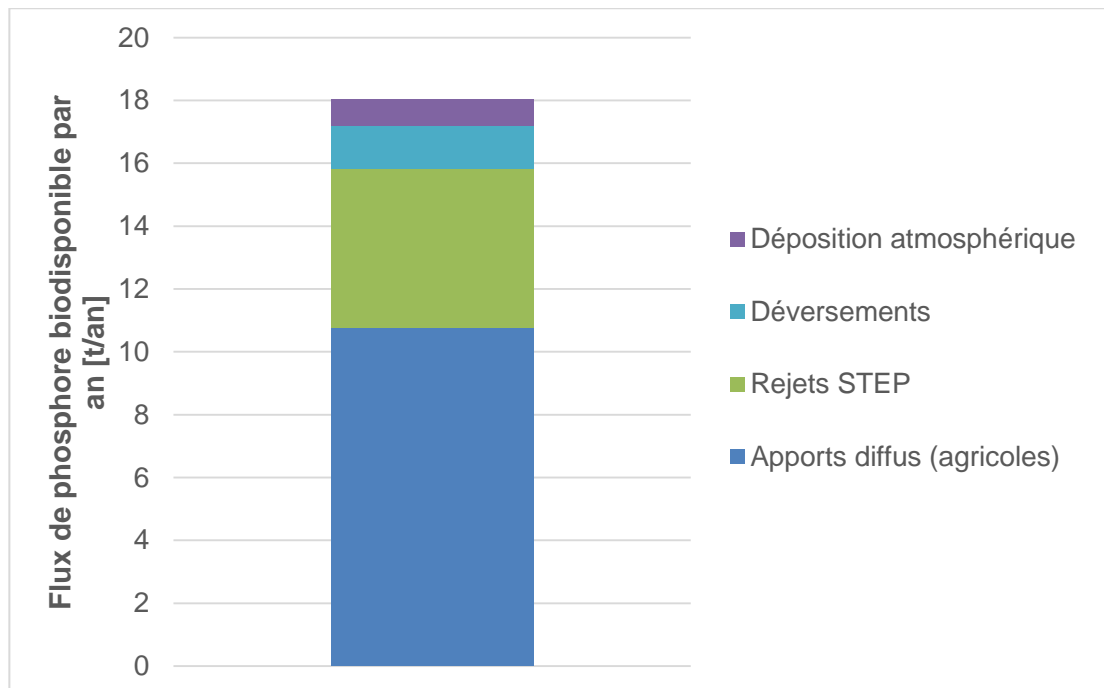


Figure 13 : Flux de phosphore biodisponible (t/an) réparti selon les sources.

La Broye est sans surprise le plus gros contributeur en phosphore biodisponible pour le lac de Morat, avec environ 60% du flux total. La Petite Glâne, l'Arbogne et le bassin versant Lac de Morat – direct contribuent tous trois à environ 10-15% du flux total alors que le Chandon et son bassin versant de 38 km<sup>2</sup> ne contribue qu'à 5% des apports en phosphore (Figure 14).

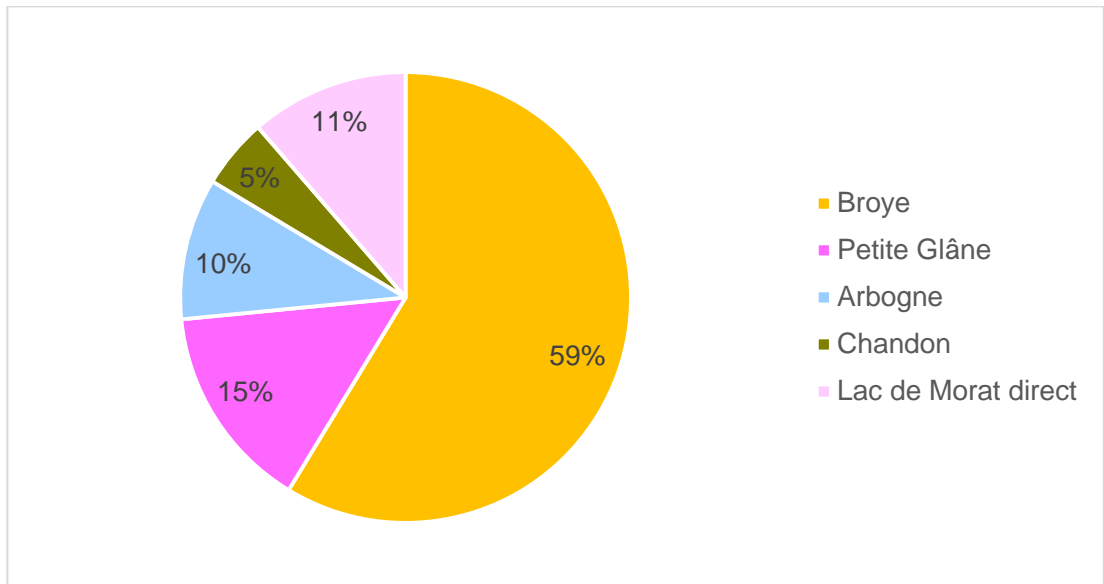


Figure 14 : Répartition du flux de phosphore biodisponible entre les différents bassins versants du périmètre d'étude.

#### 4.2.2 Flux de phosphore biodisponible par sous bassin versant

Les figures ci-dessous illustrent le flux modélisé par sous bassin versant, de manière séparée (Figure 15) et de manière cumulée (Figure 16). Le modèle illustre que les apports en phosphore biodisponible vers le lac de Morat sont issus en grande partie de la Haute-Broye et de la Moyenne Broye qui sont également les sous bassins versants les plus grands avec une surface de 163 km<sup>2</sup> pour la Haute-Broye et de 231 km<sup>2</sup> pour la Moyenne Broye. Le flux total cumulé pour le bassin versant de la Broye est de plus de 10 t de phosphore biodisponible par an (Figure 16). La Petite Glâne, l'Arbogne et le Lac de Morat – direct apportent tous trois un apport similaire vers le lac de Morat (environ 2 t/an).

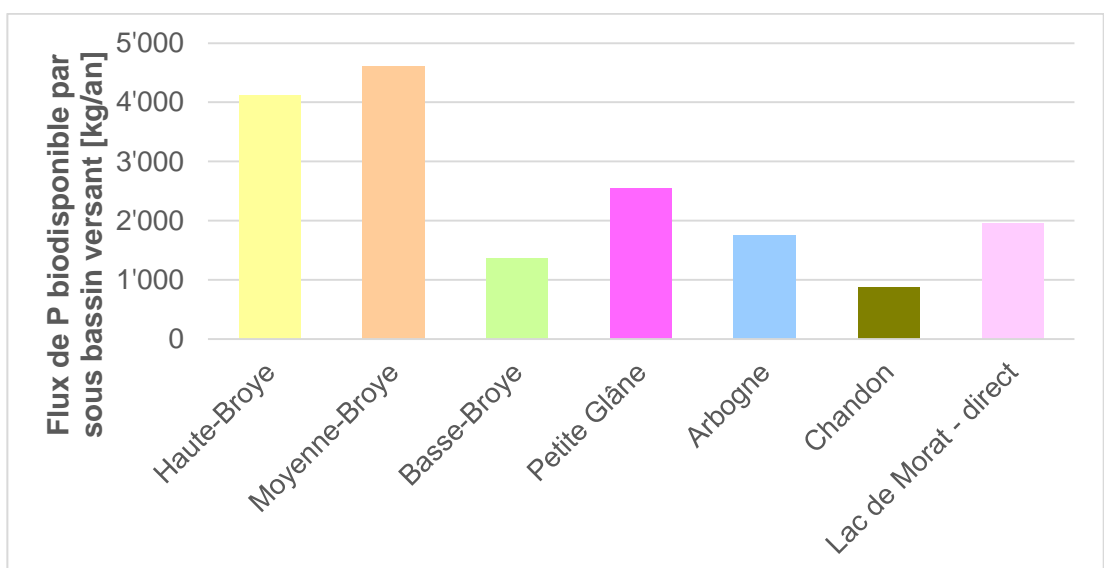


Figure 15 : Flux de phosphore biodisponible pour chaque sous bassin versant. A noter que la répartition entre les trois sous bassins versants de la Broye n'est pas basée sur des mesures mais sur la répartition donnée par MODIFFUS.

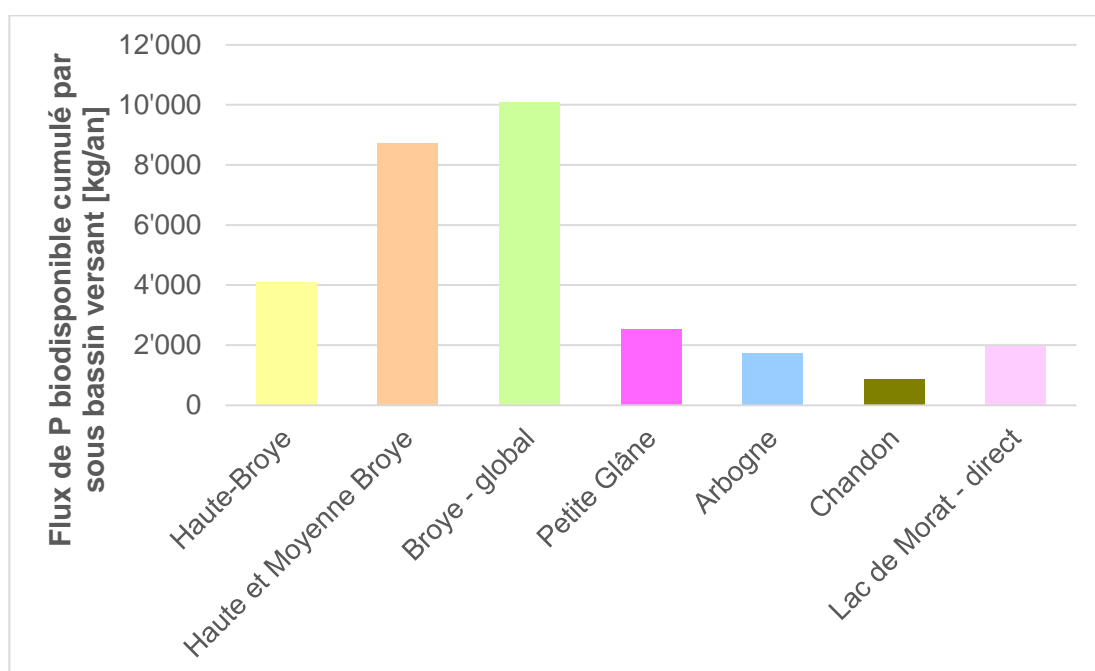
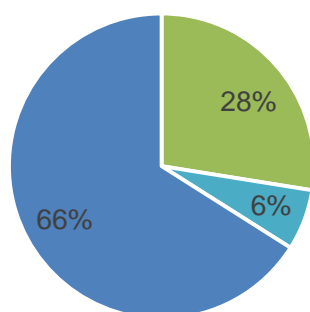


Figure 16 : Flux de phosphore biodisponible cumulé pour les points bas de chaque sous bassin versant. A noter que la répartition entre les trois sous bassins versants de la Broye n'est pas basée sur des mesures mais sur la répartition donnée par MODIFFUS.

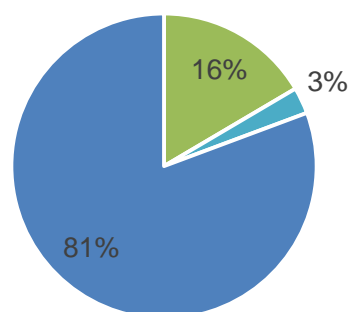
#### 4.2.3 Contribution des différentes voies d'apport de phosphore biodisponible par sous bassin versant

La Figure 17 ci-dessous illustre les contributions des différentes sources par sous bassin. On observe que la proportion de phosphore biodisponible de source ponctuelle augmente le long de la Broye. L'évolution des contributions des différentes sources suit de très près le ratio EH raccordés dans le sous bassin versant/surface agricole du sous bassin versant. Pour le périmètre Basse-Broye seul, les apports ponctuels s'élèvent à 69% du total. Cependant, en prenant en compte la totalité des apports dans la Broye au niveau de Domdidier, la répartition est similaire à celle observée dans les autres cours d'eau. Dans le sous bassin versant de l'Arbogne, le flux diffus est légèrement plus faible que la moyenne observée dans les autres bassins versants, ceci en raison de la présence de STEP rejetant d'importantes quantités de phosphore. Le bassin versant de la Petite Glâne se distingue par sa forte proportion de terres agricoles et donc une contribution importante des apports diffus (81%) et un flux de phosphore biodisponible diffus par km<sup>2</sup> important (26 kg/an/km<sup>2</sup>), il n'est donc pas étonnant que la majorité du phosphore biodisponible provienne de source diffuse.

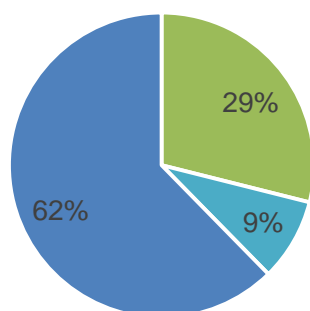
**Haute-Broye**



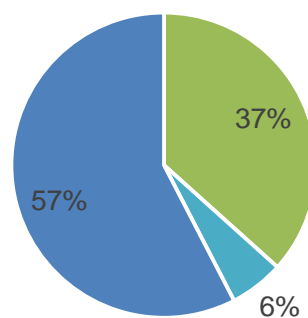
**Petite Glâne**



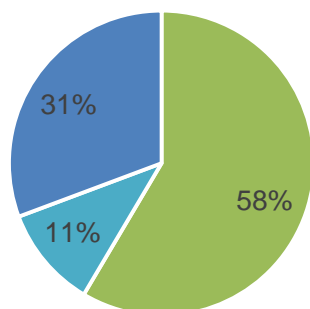
**Moyenne Broye**



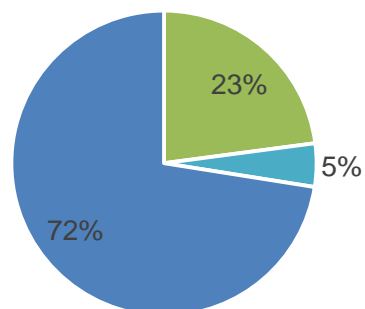
**Arbogne**



**Basse-Broye**

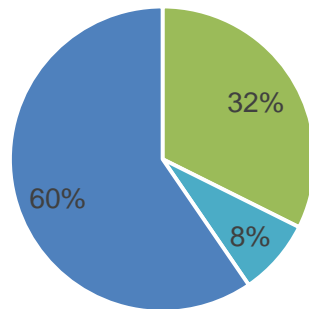


**Chandon**

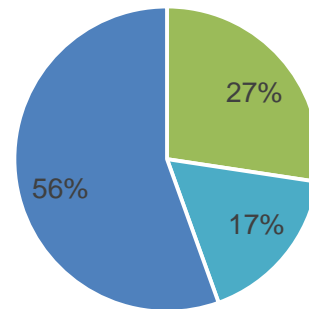




**Broye global - Domdidier**



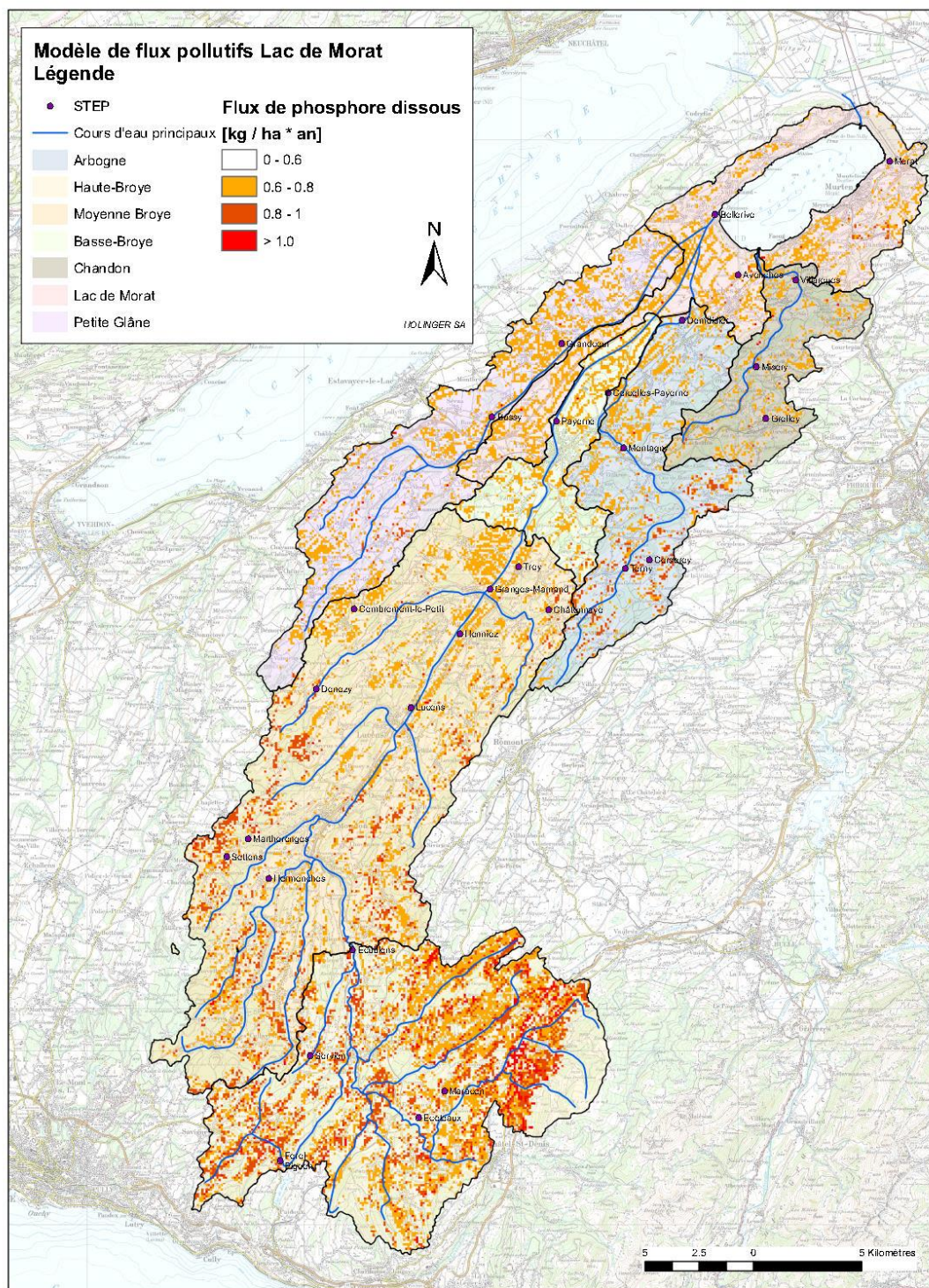
**Lac de Morat - direct**



**Figure 17 : Contribution des différentes voies d'apport (bleu foncé – apports diffus agricoles, vert – rejets STEP, bleu turquoise – déversements) au flux par sous bassin versant.**

#### **4.2.4 Sources des émissions de phosphore biodisponible diffus**

Une représentation géographique des zones liées à un apport en phosphore dissous diffus a été établie sur la base des données de MODIFFUS (Figure 18 et Annexe 3). Les flux annuels de phosphore dissous par hectare supérieurs à 0.6 kg Pdis/ha/an y sont visibles. Cette carte peut donner des indications sur des zones potentiellement problématiques en matière d'émissions de phosphore mais doit être considérée avec prudence car les particularités locales et spécifiques (p. ex. décharges, petits marais) n'ont pas été prises en compte par MODIFFUS, qui a plus pour but de donner des indications globales sur les apports à l'échelle de bassins versants.



**Figure 18 : Carte illustrant les apports annuels de phosphore dissous par hectare pour le bassin versant du lac de Morat. Seuls les flux à l'hectare supérieurs à 0.6 kg/ha/an y sont visibles.**

Le flux moyen de phosphore biodisponible diffus selon MODIFFUS par hectare par sous bassin versant est présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 6 : Flux moyen de phosphore biodisponible par hectare et par an selon le sous bassin versant et pour l'entier du bassin versant du lac de Morat.**

<b>Sous bassin versant</b>	<b>Flux moyen de P biodisponible diffus par hectare et par an [kg/ha/an]</b>
Haute-Broye	0.47
Moyenne Broye	0.35
Basse-Broye	0.35
Petite Glâne	0.36
Arbogne	0.34
Chandon	0.31
Lac de Morat - direct	0.34
Lac de Morat - global	0.37
Moyenne Suisse	0.22

Le bassin versant du lac de Morat se distingue par un flux de phosphore biodisponible diffus par hectare au-dessus de la moyenne suisse, qui se situe à 0.22 kg/ha/an (moyenne calculée par MODIFFUS sur tout le territoire suisse), le flux de la Haute-Broye étant même plus de deux fois plus élevé que la moyenne suisse. Ce périmètre a les caractéristiques des zones avec des apports importants, qui sont selon le rapport MODIFFUS : « les régions préalpines dominées par des prairies et d'autres régions avec une densité de bétail élevée »<sup>14</sup>. La part importante de prairies et de terres ouvertes sur ce sous bassin versant couplée à une topographie préalpine facilitant le ruissellement peuvent expliquer ce flux élevé.

Les figures ci-après illustrent les sources des apports de phosphore pour l'entier du bassin versant du lac de Morat (Figure 19) et pour les différents sous bassins versants (figures suivantes) selon les données de MODIFFUS. Le phosphore biodisponible diffus provient ainsi à plus de 90% de sources agricoles qui se répartissent principalement entre les apports des terres ouvertes (60%) et des prairies et pâturages (29%). Dans la Haute-Broye, on retrouve une contribution plus importante que la moyenne des prairies et pâturages (plus de 50% des apports) alors que les autres sous bassins versants sont plus largement impactés par les terres arables. Ces illustrations donnent des indications supplémentaires sur les secteurs à cibler dans les divers sous bassins versants.

<sup>14</sup> Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E., Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. rapport Agroscope réalisé sur mandat de l'OFEV, 2015

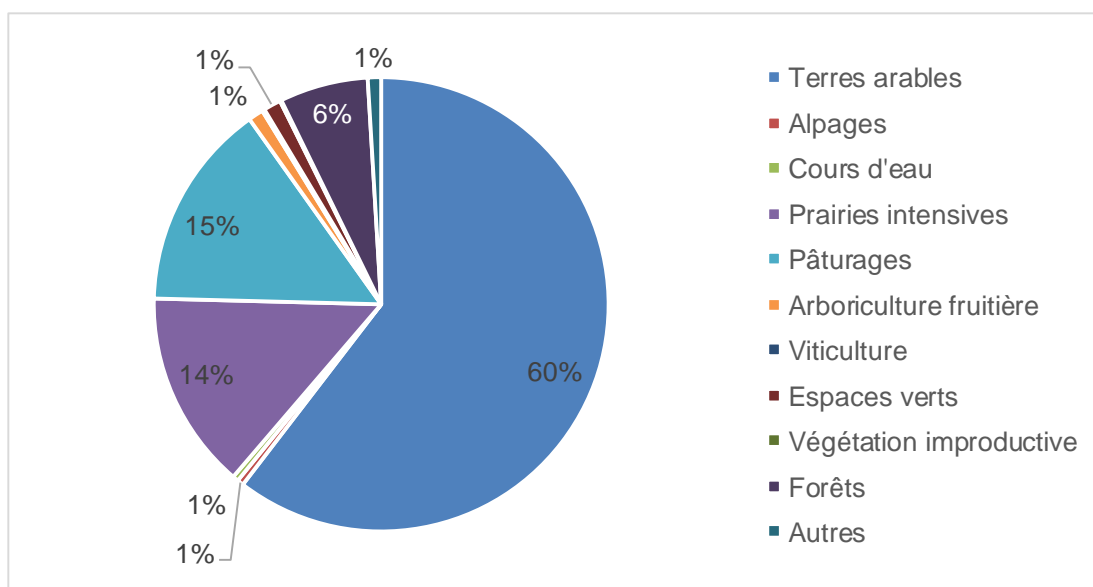


Figure 19 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour l'entier du bassin versant du lac de Morat.

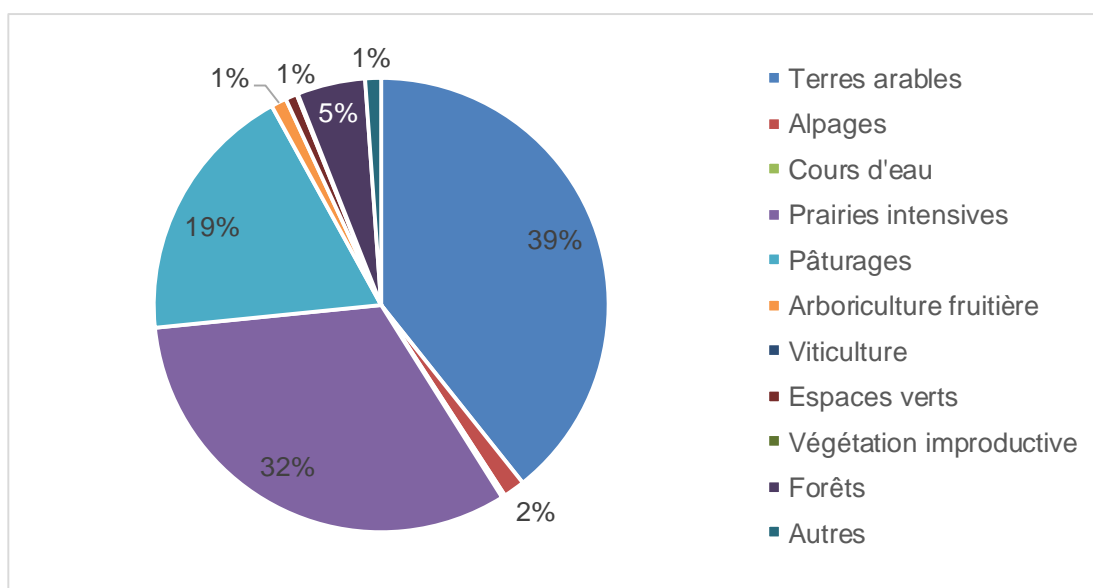


Figure 20 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant de la Haute-Broye.

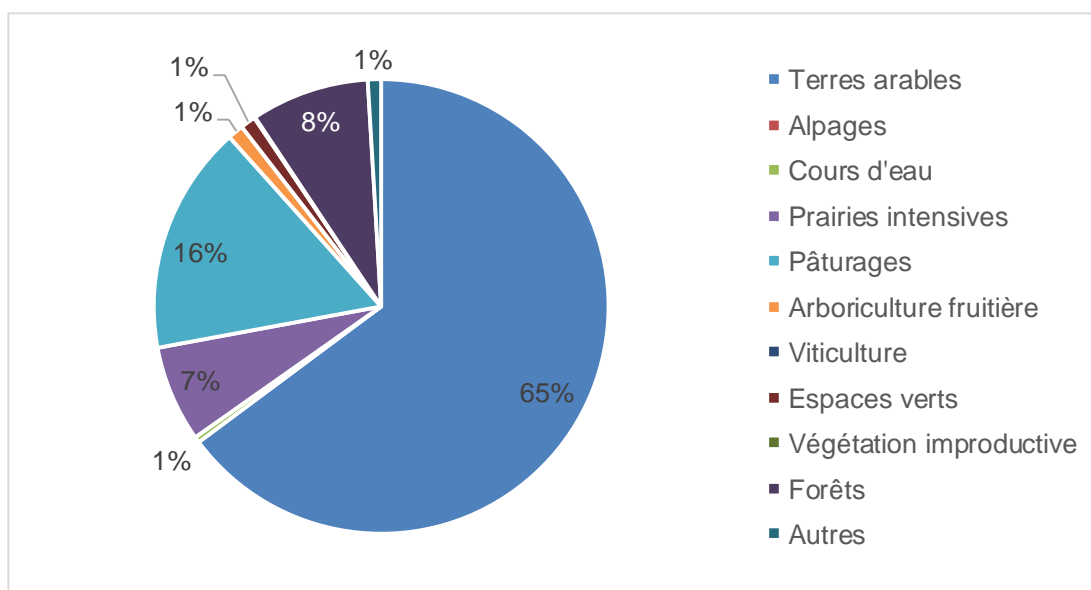


Figure 21 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant de la Moyenne Broye.

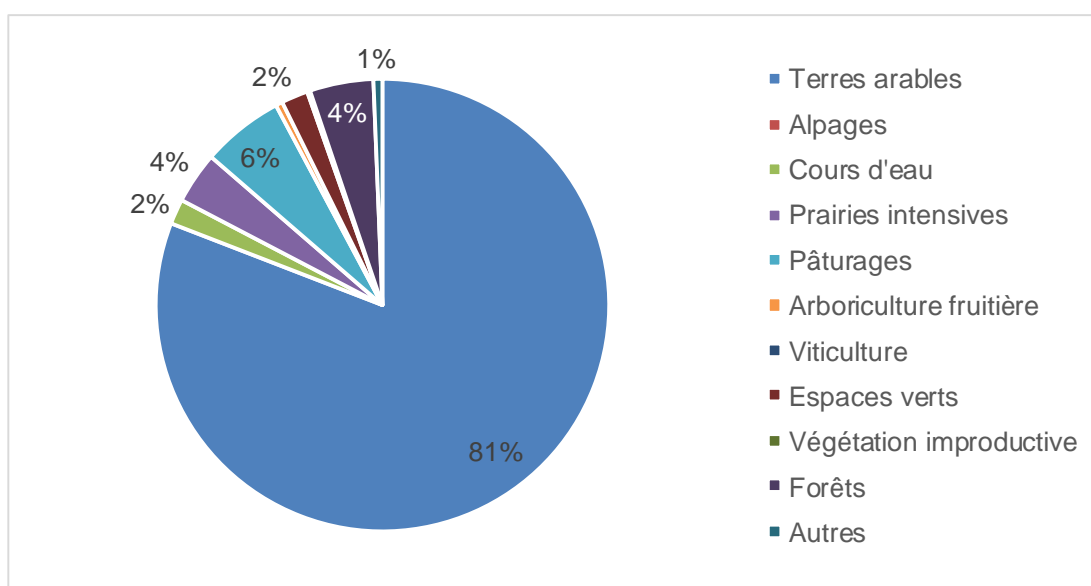


Figure 22 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant de la Basse-Broye.

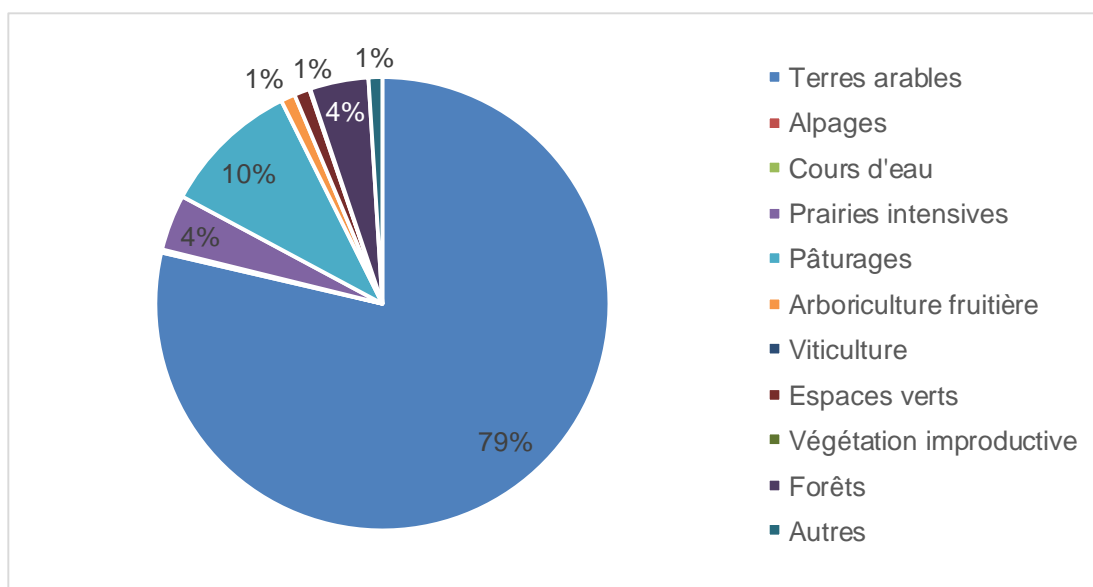


Figure 23 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant de la Petite Glâne.

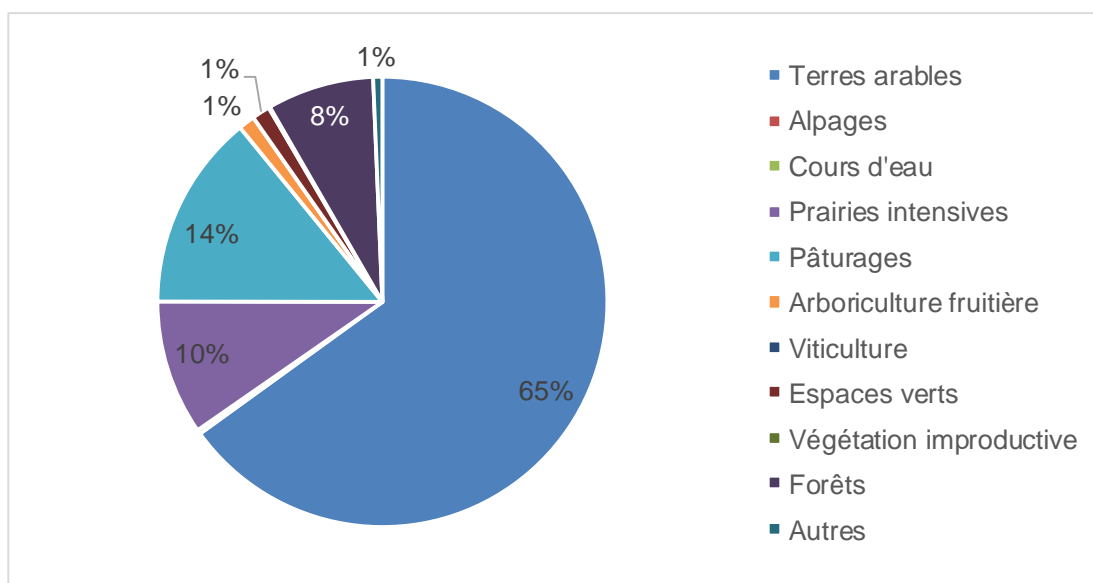


Figure 24 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant de l'Arbogne.

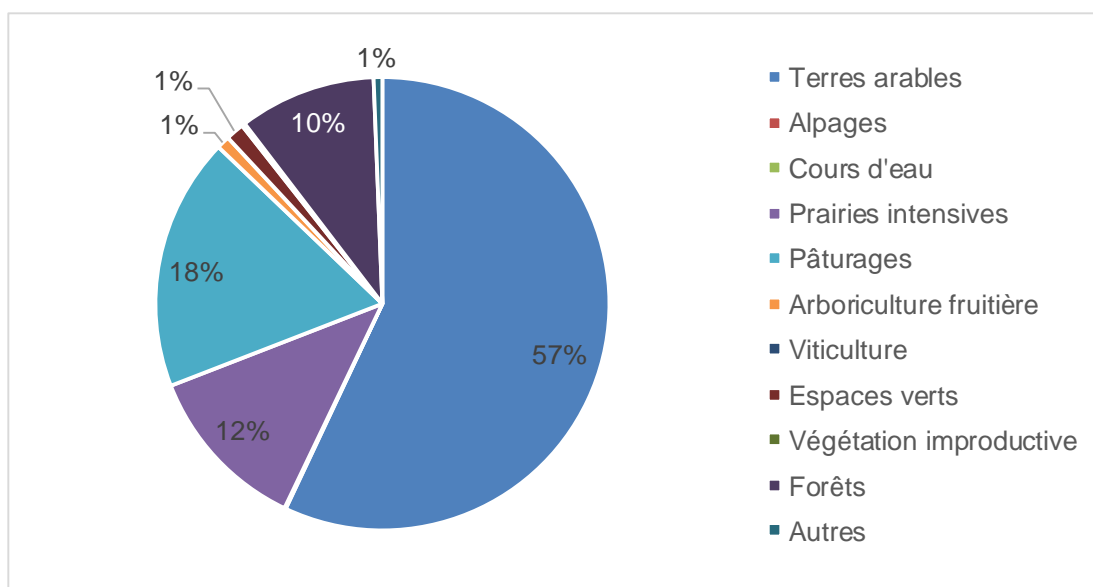


Figure 25 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant du Chandon

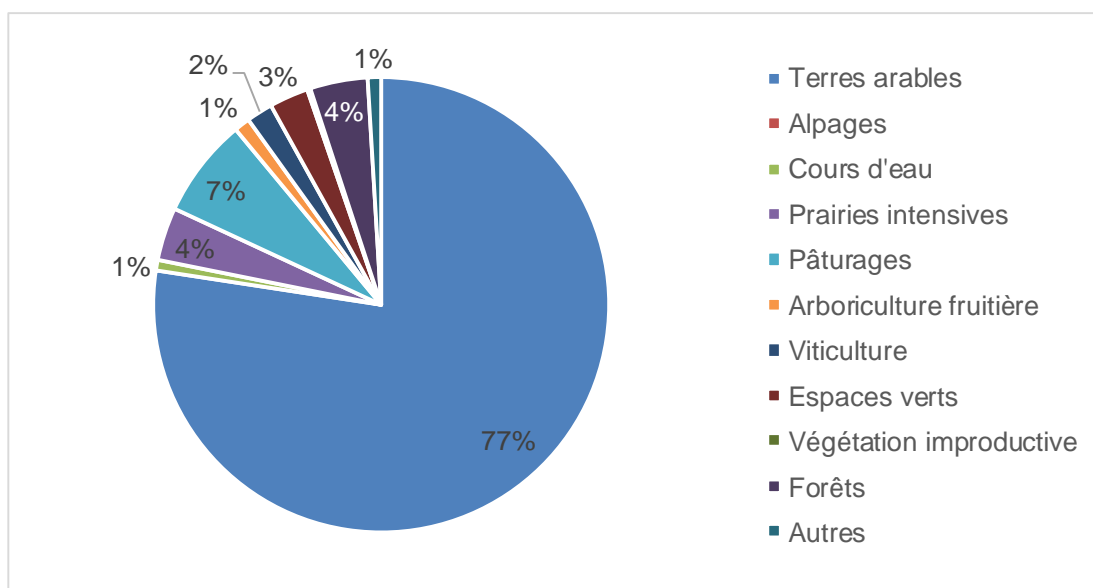


Figure 26 : Sources (catégories d'utilisation du sol) des apports de phosphore biodisponible diffus pour le sous bassin versant Lac de Morat -- direct

#### 4.3 Comparaison entre les flux de phosphore total modélisés et mesurés

Le phosphore total est mesuré dans les cours d'eau, contrairement au phosphore dissous (voir chapitre 2.2.3). Il est donc possible de directement comparer les flux modélisés et mesurés. Pour la Petite Glâne, l'Arbogne et le Chandon, le flux modélisé est supérieur au flux mesuré, le flux modélisé étant entre 25 et 50% plus élevé que le flux mesuré (Figure 28). Ces résultats sont comparables aux différences constatées par J. Hürdler et V. Prasuhn lors de la comparaison entre les flux de P<sub>tot</sub> modélisés

et ceux mesurés dans des cours d'eau dans 10 bassins versants différents<sup>15</sup>.

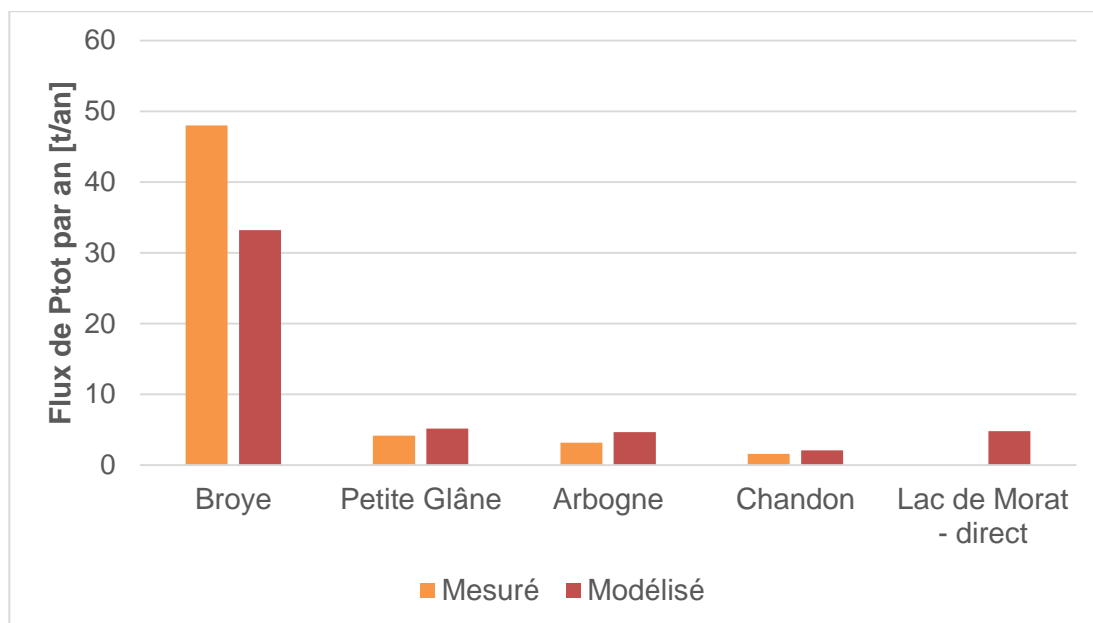


Figure 27 : Comparaison entre les flux de Ptot modélisé et mesuré pour les sous bassins versants.

L'image est différente dans la Broye, où le flux modélisé est inférieur au flux mesuré (ce dernier étant 40% plus élevé). Cette observation, couplée à un rapport  $\text{PO}_4^{3-}/\text{Ptot}$  et  $\text{Pdis}/\text{Ptot}$  beaucoup plus faible que dans les autres bassins versants (voir chapitre 4.1) et à l'observation de la diminution graduelle de ces rapports tout au long de la Broye (Figure 28), semble révéler la présence d'une source importante de phosphore particulière dans la Broye non prise en compte dans MODIFFUS et ne provenant à priori pas de facteurs relatifs à l'utilisation du sol.

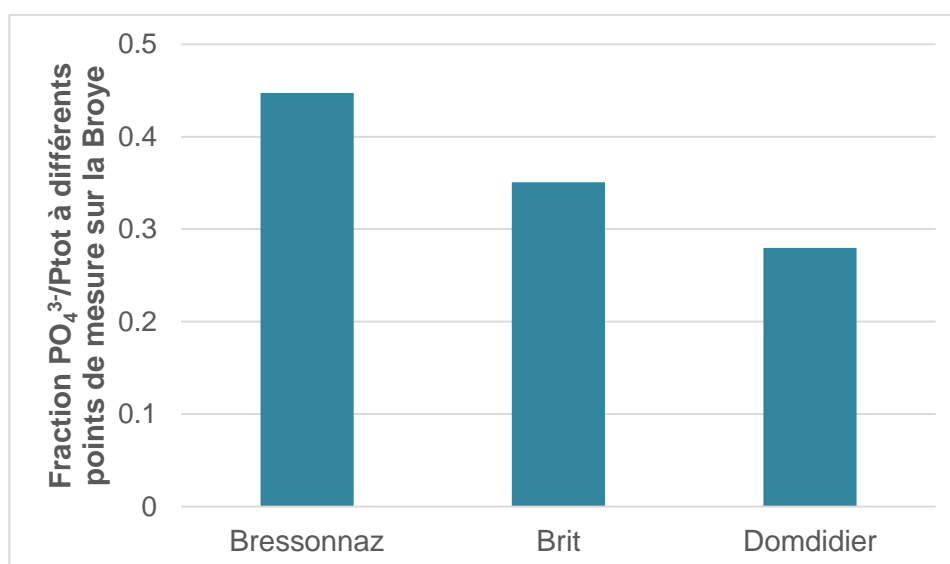


Figure 28 : Fraction  $\text{PO}_4^{3-}/\text{Ptot}$  à différents points de prélèvement sur la Broye.

<sup>15</sup> Hürdler, J., Prasuhn, V., Spiess, E., Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz. MODIFFUS 3.0. rapport Agroscope réalisé sur mandat de l'OFEV, 2015



Il serait intéressant d'approfondir cet aspect et de comprendre les sources d'un tel apport en phosphore, afin notamment d'exclure d'éventuels rejets anthropiques importants. Dans le cadre de cette étude, les flux ont été calibrés sur les flux mesurés dans les cours d'eau, pour les mêmes raisons qu'en ce qui concerne le phosphore biodisponible (voir chapitre 4.1).

#### 4.4 Flux de phosphore total modélisé à l'état actuel

##### 4.4.1 Flux de phosphore total

Le flux modélisé de phosphore total se monte à 62 tonnes par an en moyenne (Figure 29). Comme tous les apports provenant des STEP et des réseaux sont considérés comme biodisponibles, ces montants sont les mêmes ici, à savoir 5 t/an provenant des rejets de STEP et 1,4 t/an provenant des déversements des réseaux. Le flux de P<sub>tot</sub> diffus est quant à lui 5 fois plus élevé que le P<sub>dis</sub>. Le P<sub>tot</sub> est ainsi encore plus largement d'origine diffuse (88% du total).

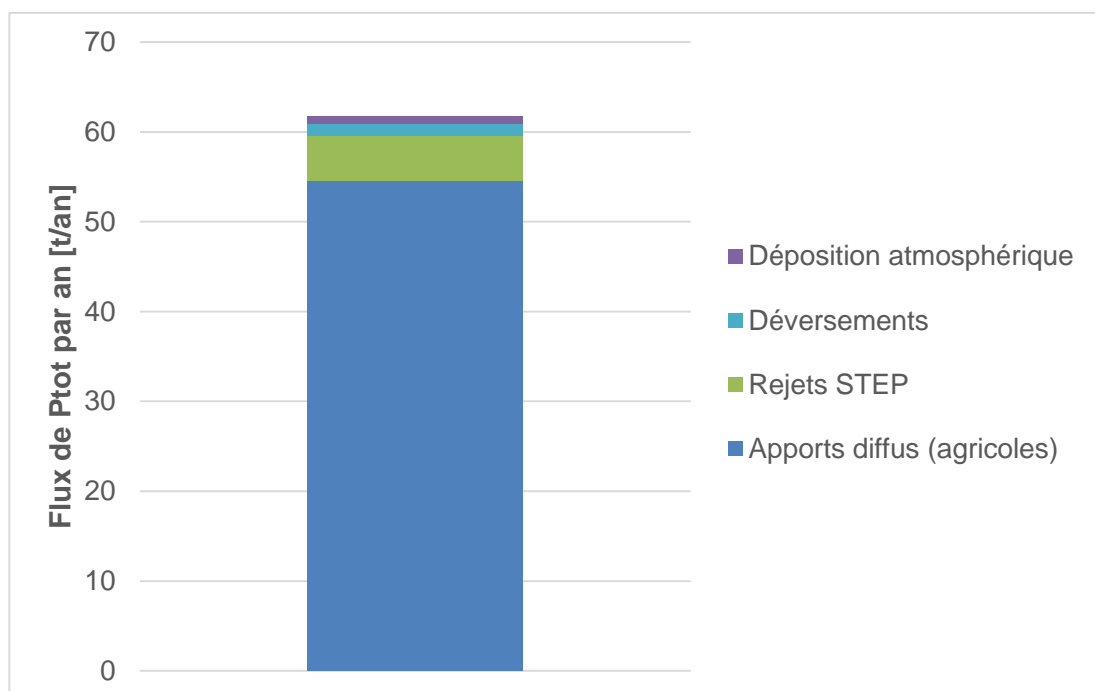


Figure 29 : Flux de phosphore total (en t/an), réparti selon les sources.

La répartition entre les différents cours d'eau est encore plus dominée par la Broye que pour le phosphore dissous (voir chapitre 4.2.1). Cette dernière achemine environ 80% du flux total vers le lac de Morat (Figure 30).

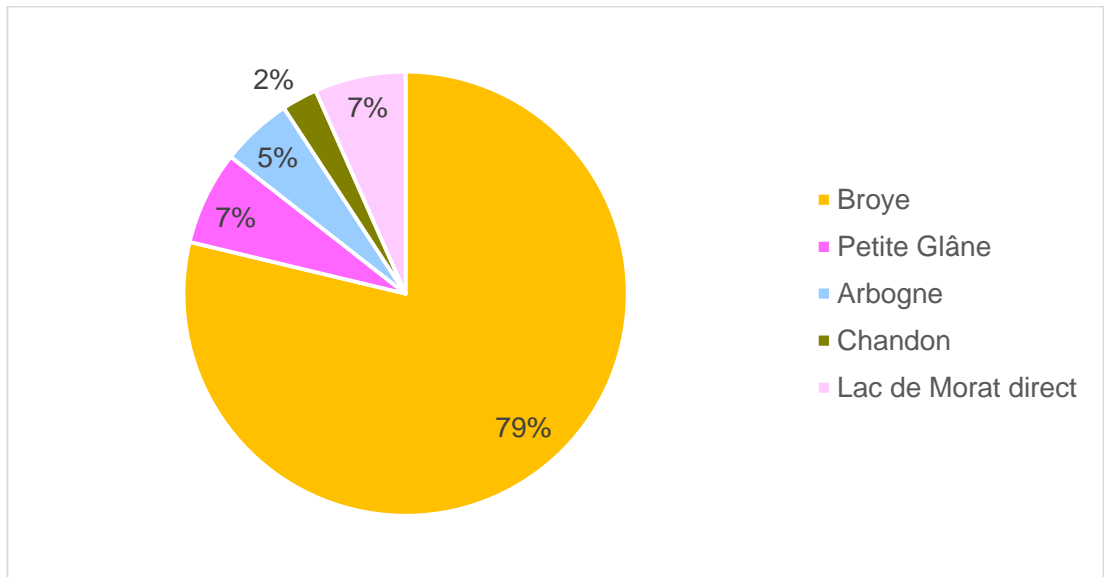


Figure 30 : Répartition du flux de phosphore total modélisé entre les différents bassins versants du périmètre d'étude.

#### 4.4.2 Flux de phosphore total par sous bassin versant

Les flux de P<sub>tot</sub> par sous bassins versants se répartissent de la même manière que les flux de phosphore biodisponible (voir chapitre 4.2.2) et sont illustrés dans les figures ci-dessous.

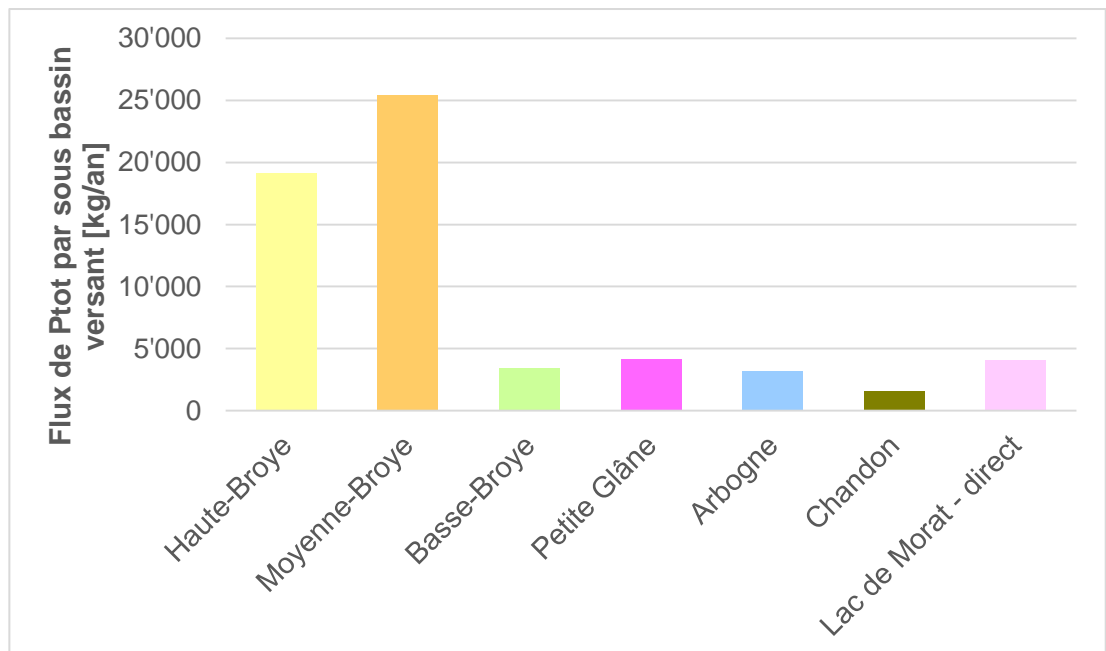


Figure 31 : Flux de P<sub>tot</sub> modélisé par sous bassin versant. A noter que la répartition entre les trois sous bassins versants de la Broye n'est pas basée sur des mesures mais sur la répartition donnée par MODIFFUS.

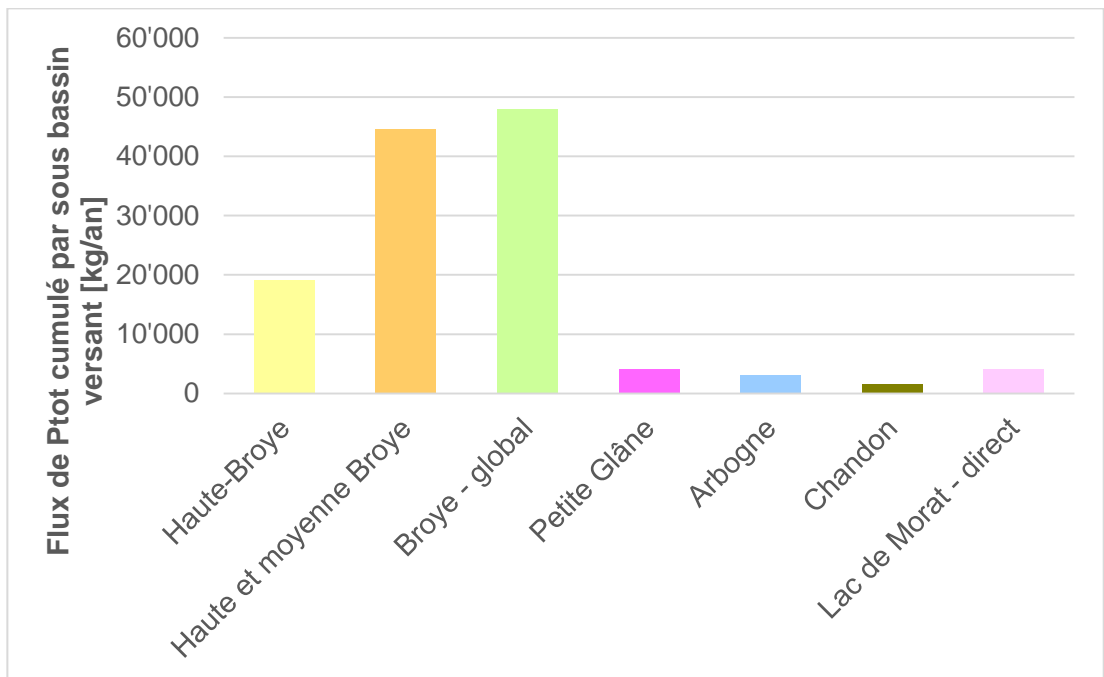
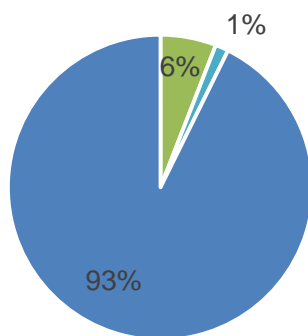


Figure 32 : Flux de Ptot modélisé pour les points bas de chaque sous bassin versant. A noter que la répartition entre les trois sous bassins versants de la Broye n'est pas basée sur des mesures mais sur la répartition donnée par MODIFFUS.

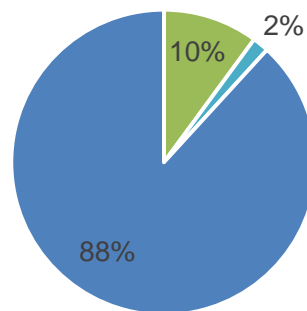
#### 4.4.3 Contribution des différentes voies d'apport de phosphore total par sous bassin versant

Les contributions des différentes sources par sous bassin versant au flux de Ptot modélisé sont présentées ci-après.

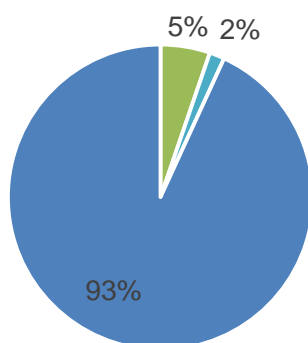
**Haute-Broye**



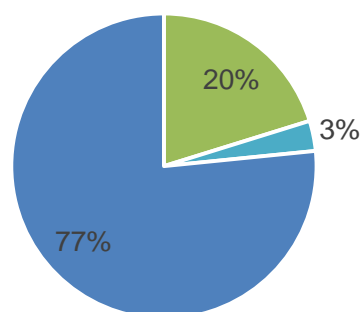
**Petite Glâne**



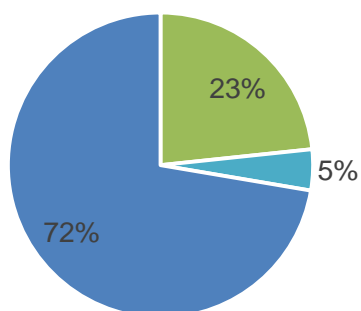
**Moyenne Broye**



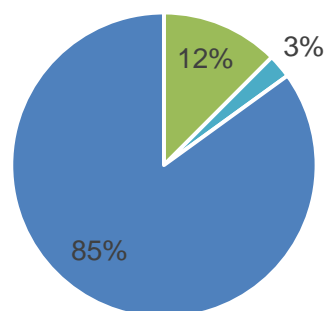
**Arbogne**



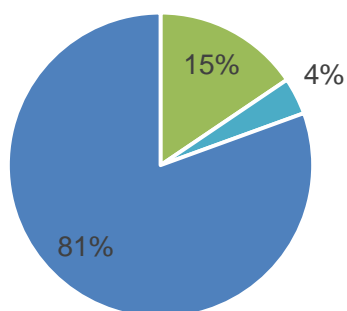
**Basse-Broye**



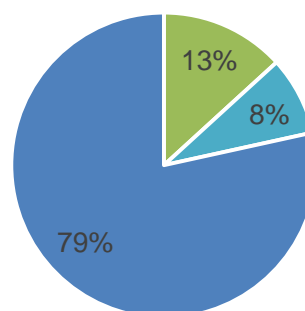
**Chandon**



**Broye global - Domdidier**



**Lac de Morat - direct**



**Figure 33 : Contribution des différentes voies d'apport (bleu foncé – apports diffus agricoles, vert – rejets STEP, bleu turquoise – déversements) au flux de Ptot modélisé par sous bassin versant.**

Contrairement au phosphore dissous (voir chapitre 4.2.3), le phosphore total provient majoritairement de sources diffuses dans tous les sous bassins versants.

## 4.5 Limites du modèle

Le modèle de bilan de flux établi dans le cadre de cette étude se veut simple et facile d'utilisation. Il a pour but premier d'avoir une vue d'ensemble des apports de phosphore vers le lac de Morat. Il doit de plus permettre d'identifier l'importance des différentes sources pour les sous bassins versants étudiés.

Pour le phosphore biodisponible, la limite principale provient de la difficulté de calibrer le modèle de manière adéquate en raison de l'absence de mesures du phosphore dissous dans les cours d'eau. Il a ainsi uniquement été possible de réaliser une estimation de ce flux, considérée toutefois comme réaliste en raison du nombre important de mesures et de la robustesse du facteur  $P_{dis}/PO_4^{3-}$  dans différents cours d'eau. De plus, les relations présentées au chapitre 2.4, à savoir que la plus grande partie des apports de phosphore vers le lac de Morat sont liés à des périodes de hauts débits, soulignent la difficulté de déterminer des flux sur la base de mesures ponctuelles à la fois pour le phosphore total et le phosphore dissous.

Concernant le flux lié aux déversements des réseaux, celui-ci a été estimé sur la base d'études effectuées dans d'autres bassins versants en raison de l'absence de données à ce sujet pour le bassin versant du lac de Morat. Ces valeurs permettent ainsi d'obtenir un ordre de grandeur du flux de phosphore attendu. Vu la relativement faible part que cela représente au flux global, cette estimation des apports est jugée suffisante pour ce type de modèle. Ce dernier devrait cependant être complété dès que des données, par exemple issues des PGEE, sont disponibles.

Les flux déterminés pour le sous bassin versant du Chandon, à la fois mesurés et modélisés, sont liés à une plus grande incertitude. En effet, le flux mesuré se base sur un nombre plus restreint de valeurs comme la station de mesure est régulièrement perturbée par des dépôts (voir chapitre 2.2.2). Le flux modélisé présente quant à lui des problèmes liés à la taille du bassin versant. Celui-ci ne fait que 38 km<sup>2</sup> alors que le modèle MODIFFUS prédit des flux moyens valables pour des périmètres d'une surface supérieure à 50 km<sup>2</sup>, ceci en raison de l'hétérogénéité des bases de données. Cet aspect n'a cependant pas d'incidence sur la détermination du flux global et n'est pas considéré comme limitant, le Chandon contribuant relativement peu au flux total.

Les apports liés à la déposition atmosphérique ont quant à eux été estimés sur la base des données de MODIFFUS. L'incertitude sur ces chiffres est toutefois grande et des mesures sont en cours dans d'autres lacs pour obtenir des indications plus précises sur l'importance de ces apports, probablement surestimés par MODIFFUS.

## 5 RÉSULTATS POUR L'ÉTAT FUTUR ET EFFET DE MESURES POSSIBLES

### 5.1 Régionalisations et renforcement des normes en P<sub>tot</sub> sur les STEP

#### 5.1.1 Flux total de phosphore biodisponible à l'état futur

Dans un deuxième temps, des mesures prévues sur les STEP ont été prises en considération dans le modèle afin d'estimer leur incidence sur le flux de phosphore biodisponible. La figure ci-dessous illustre les flux de phosphore biodisponible pour l'état futur (2030) y compris régionalisations avec différentes normes de rejet sur les STEP régionales (Figure 34). La croissance démographique d'ici à 2030 apportera une augmentation des charges à traiter dans les STEP de l'ordre de 25% alors que les débits connaîtront une hausse de 17%. Les charges de phosphore déversées par les réseaux augmenteront aussi légèrement en raison de la croissance démographique (350 kg/an supplémentaires). Le renforcement des normes de rejet permet de limiter la hausse des flux de phosphore en sortie de STEP.

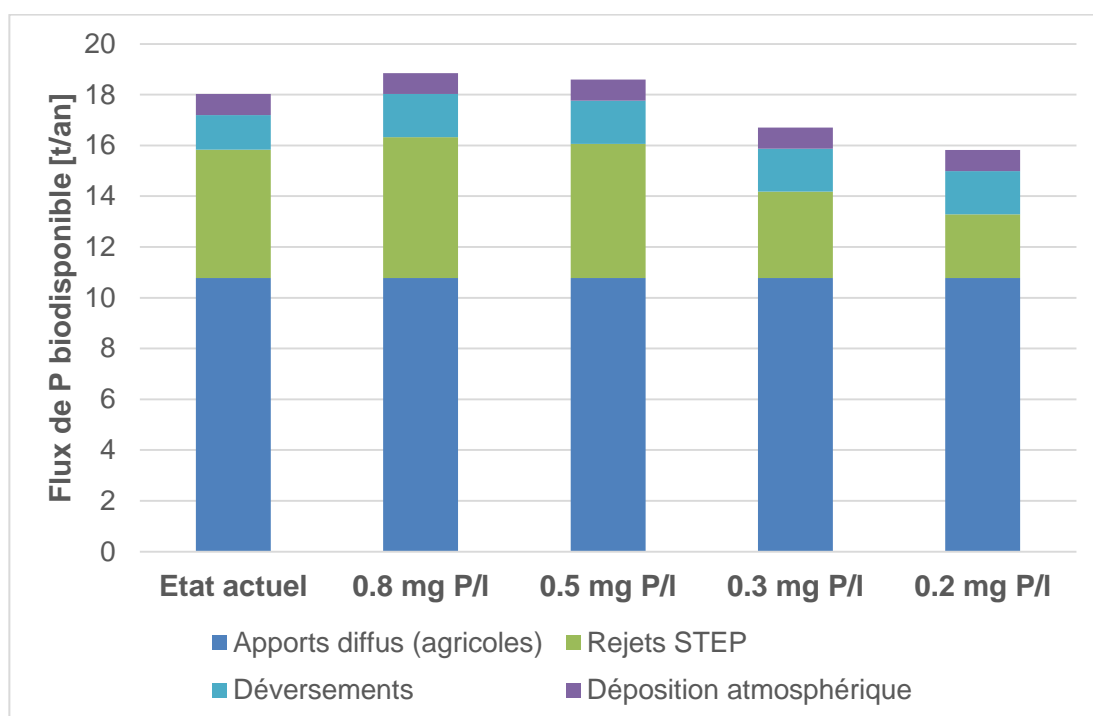


Figure 34 : Flux de phosphore biodisponible pour l'état actuel et pour 2030 pour différentes normes de rejet sur les STEP régionales.

Une norme à 0.5 mg P/l permet de maintenir le niveau actuel malgré la croissance démographique, les quelques 200 kg supplémentaires par an pouvant être attribués à l'agrandissement du bassin versant (raccordement de 5 STEP hors bassin versant sur Payerne (Chevroux), Basse-Broye-Vully (Cudrefin, Chabrey, Delley-Portalban) et Morat (Kerzers)). Un non-renforcement des normes de rejet entrainerait quant à lui une augmentation de quelques 600 kg/an du flux de phosphore vers le lac de Morat. Un renforcement des normes de rejet en P<sub>tot</sub> à 0.3 mg P/l permettrait une réduction

du flux de phosphore biodisponible de 1.7 t/an (diminution du flux total de 7.5% et du flux des rejets de STEP de 33%) alors qu'une norme à 0.2 mg P/l permettrait un gain de 2.6 t/an par rapport à l'état actuel, ce qui représente une réduction du flux global de 12% et une diminution des rejets provenant des STEP de plus de 50%. Cependant, cette diminution ne suffit à elle seule pas à atteindre l'objectif et des réductions du phosphore diffus d'un tiers seraient également nécessaires.

### 5.1.2 Flux de phosphore biodisponible par sous bassin versant à l'état futur (2030) avec régionalisations et norme à 0.2 mg P/l

Les flux par sous bassins versants à l'état futur se voient légèrement modifiés avec les régionalisations de STEP et un abaissement des normes de rejet à 0.2 mg P/l. La majorité des STEP déversant actuellement leurs eaux dans de petits cours d'eau disparaîtront, les flux de phosphore liés aux rejets de STEP se concentrant sur la Broye et le sous bassin versant Lac de Morat – direct. Hors renforcement des normes de rejet, ces développements n'auront pas d'impact sur le flux total de phosphore vers le lac de Morat, le bassin versant global restant généralement non modifié. Par contre, les projets de régionalisation entraîneront une réduction de l'apport en ammonium dans les petits cours d'eau qui sera très bénéfique pour la faune aquatique, l'ammoniaque étant très toxique pour les poissons et toxique pour les invertébrés.

Concernant le phosphore, l'amélioration de la performance de traitement permettra de diminuer la charge de phosphore déversée dans tous les sous bassins versants hormis Lac de Morat – direct et ce, malgré l'augmentation du nombre d'équivalents-habitants raccordés sur ces différents bassins versants.

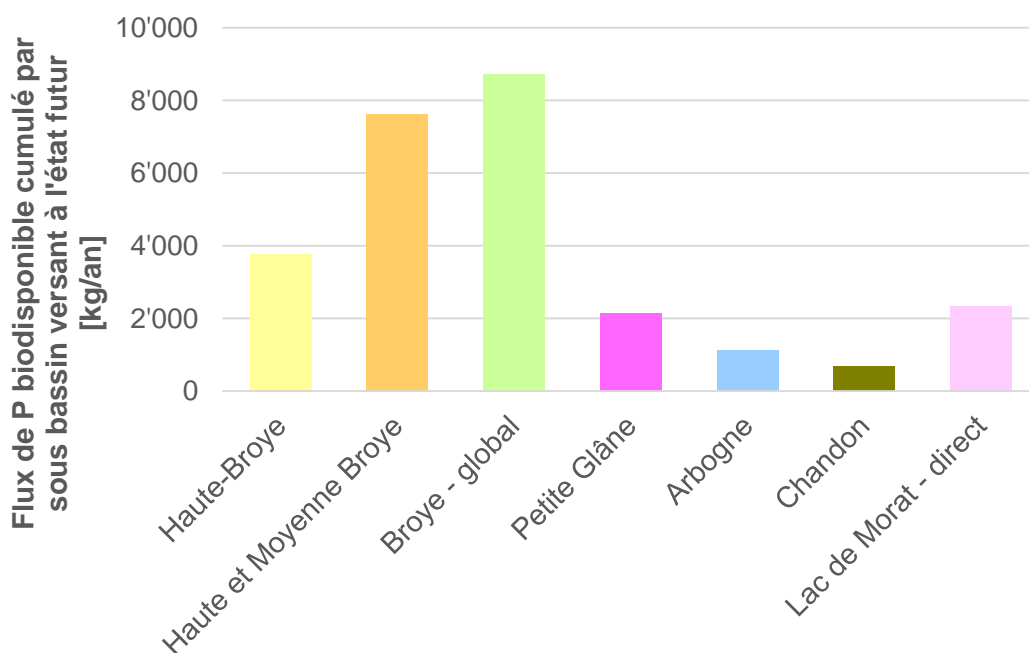
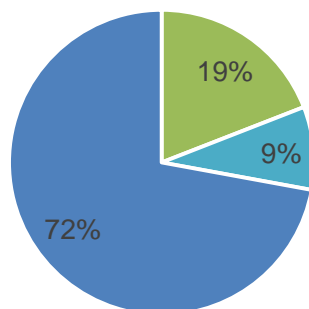


Figure 35 : Flux de phosphore biodisponible cumulé par sous bassin versant pour l'état futur (2030) y compris régionalisations et norme à 0.2 mg P/l.

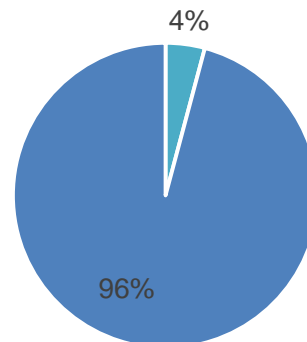
### 5.1.3 Contribution des différentes voies d'apport à l'état futur (2030)

L'Arbogne, le Chandon et la Petite Glâne seront libérés du flux de phosphore provenant du rejet d'eaux épurées à l'état futur (Figure 36). Les apports proviendront essentiellement de source diffuse avec une petite contribution des déversements des réseaux de l'ordre de quelques pourcents. Dans les sous bassins versants de la Haute-Broye et de la Moyenne Broye, la contribution liée aux STEP diminuera en raison du renforcement des normes de rejet, la nature du bassin versant n'étant pas amenée à changer. Dans la Basse-Broye, l'agrandissement du bassin versant (raccordement de 6 STEP supplémentaires) est compensé par le renforcement des normes de rejet, entraînant une diminution de la contribution des rejets de STEP de 58 à 45%. Ainsi, la Broye ne se voit pas fortement impactée par la centralisation de l'épuration des eaux sur son cours, la situation en matière de phosphore s'améliorant avec les régionalisations grâce aux normes renforcées. Le périmètre Lac de Morat – direct acceptera quant à lui les charges déviées de l'Arbogne et du Chandon ainsi que de 4 STEP situées actuellement hors du bassin versant du lac de Morat (ajout de 8 STEP à ce sous bassin versant) et verra sa contribution provenant des rejets de STEP augmenter (de 27 à 35%).

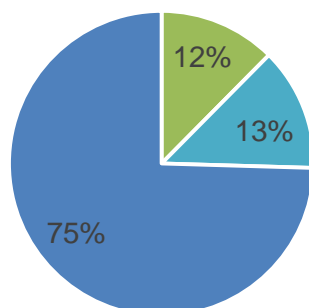
**Haute-Broye**



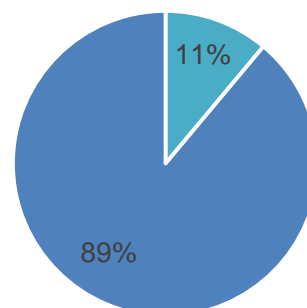
**Petite Glâne**



**Moyenne Broye**

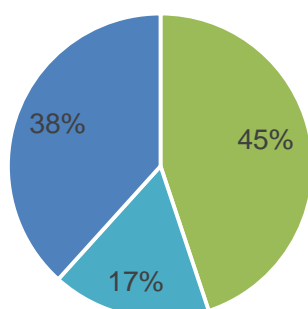


**Arbogne**

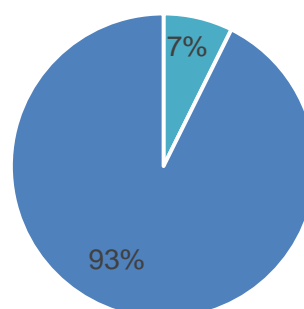




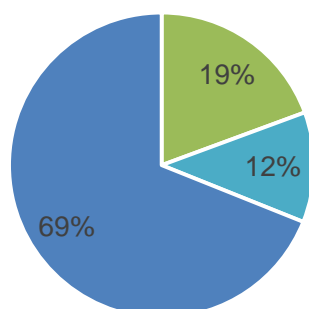
**Basse-Broye**



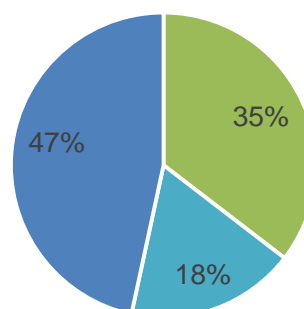
**Chandon**



**Broye global - Domdidier**



**Lac de Morat - direct**



**Figure 36 : Contribution des différentes voies d'apport (bleu foncé – apports diffus agricoles, vert – rejets STEP, bleu turquoise – déversements) au flux pour l'état futur (2030) y c. régionalisations par sous bassin versant.**

#### 5.1.4 Estimation des coûts des mesures

Le respect d'une norme à 0.2 mg P/l sur le Ptot nécessite la mise en place de filtres à sable bicouches. Selon le procédé choisi, le traitement des micropolluants requiert lui aussi des filtres à sable, que ce soit pour retenir le charbon actif en poudre ou pour éliminer les sous-produits de l'ozonation biodégradables. L'introduction de l'étape d'élimination des micropolluants sur les futures STEP régionales représente ainsi une opportunité de synergie.

Dans le cas où les micropolluants sont éliminés par un procédé au charbon actif en poudre (CAP), des filtres à sables bicouches sont également requis. Il est donc supposé que le traitement du phosphore n'engendrera pas de coûts d'investissement supplémentaires. Quant aux coûts d'exploitation (essentiellement pour l'achat de chlorure ferrique supplémentaire), ils sont estimés à environ 100'000 CHF/an pour le traitement plus poussé du phosphore sur les 5 futures STEP régionales. Une ozonation doit être équipée d'un traitement biologique complémentaire (filtres à sable monocouches) afin d'éliminer les produits de réaction biodégradables. Le respect d'une

exigence renforcée sur le phosphore entraîne ainsi un surcoût lié au dimensionnement plus grand des filtres à sables. Celui-ci a été estimé sur la base des coûts d'investissement approximatifs de la STEP de Morat à 10 CHF/EH, auxquels s'ajoutent les mêmes coûts d'exploitation de 100'000 CHF/an pour l'ensemble des STEP régionales. Si un procédé de traitement des micropolluants sans filtration sur sable est choisi, le coût des filtres devrait être entièrement supporté par le traitement du phosphore et cette option s'avèrerait économiquement peu intéressante.

A l'état futur, environ 260'000 EH seront raccordés aux STEP régionales traitant les micropolluants. Avec une norme à 0.2 mg P/l, ce sont 2.6 tonnes de phosphore supplémentaires par an qui seront éliminées par ces STEP. Par tonne de phosphore supplémentaire éliminée par an (horizon 2030), il est ainsi estimé que le coût total serait d'environ 1 mio CHF si les micropolluants sont traités au CAP (coûts d'exploitation annuels de 100'000 CHF x 10 ans). Si les micropolluants sont traités par ozonation avec filtres à sable monocouches, le surcoût lié au traitement du phosphore serait d'environ 2 mio de CHF par tonne de phosphore éliminée annuellement (investissement de 1 mio et de CHF et coûts d'exploitation annuels de 100'000 CHF x 10 ans).

## 5.2 Mesures sur les apports diffus

Les résultats présentés jusqu'ici illustrent que des efforts sur les STEP seules ne permettront pas de réduire suffisamment les apports en phosphore biodisponible vers le lac de Morat pour que celui-ci atteigne l'état méso-eutrophe souhaité. Des mesures visant à réduire les apports diffus sont donc également nécessaires. Des réductions importantes des apports de phosphore ont pu être obtenues dans d'autres lacs suisses (lacs de Baldegg et de Hallwil). Afin de donner certaines pistes qui pourraient également être envisagées pour le bassin versant du lac de Morat, le chapitre suivant présente une liste de mesures qui ont été un succès dans le cas du lac de Hallwil.

### 5.2.1 Mesures prises dans les bassins versants du lac de Hallwil

Entre 2001 et 2010, des mesures prises dans l'agriculture afin de réduire les apports en phosphore vers le lac de Hallwil ont été rémunérées via un projet phosphore selon l'Art. 62a de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), nécessitant de plus une coopération inter-cantonale entre les cantons d'Argovie et de Lucerne et des mesures différenciées en fonction du canton. Ces interventions ont permis de réduire de moitié les pertes de nutriments provenant de l'agriculture<sup>16</sup>. Dans le canton d'Argovie, les mesures suivantes ont été soutenues financièrement dans le cadre du projet de phosphore du lac de Hallwil :

- Encouragement du semis direct dans le but de réduire l'érosion des sols
- Mise en place de bandes et zones tampon le long des cours d'eau permettent de réduire le ruissellement de surface

---

<sup>16</sup> Stöckli A. Dem Hallwilersee geht es immer besser. Umwelt Aargau 49, 2010

- Réduction des apports d'engrais phosphatés pour réduire les stocks de nutriments dans les sols surfertilisés

C'est la compensation financière attribuée pour réduire les apports en engrais phosphatés qui s'est révélée être la mesure la plus efficace. Elle a permis d'éviter le transfert d'excédents d'engrais de ferme à partir du canton de Lucerne. Ce sont ainsi 57 tonnes de phosphore qui n'ont pas été appliquées sur les sols de la partie argovienne du bassin versant du lac de Hallwil entre 2002 et 2009 (Figure 37).

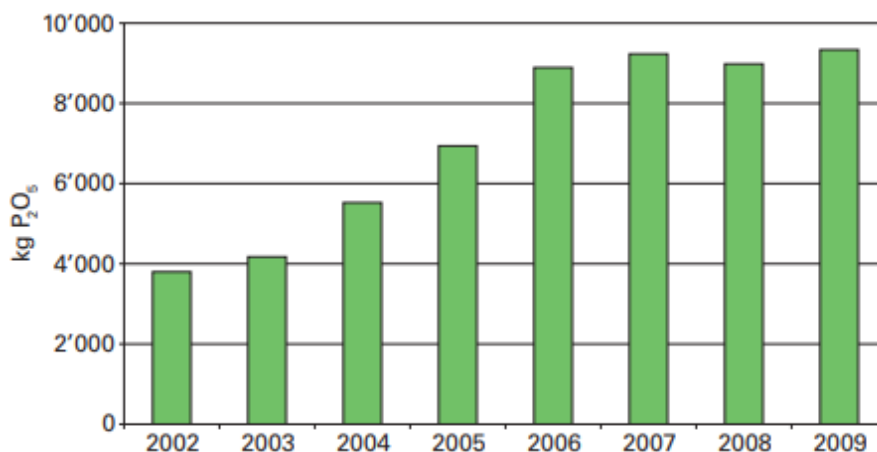


Figure 37 : Quantité totale d'engrais phosphaté non appliqué grâce à la compensation financière<sup>17</sup>



Figure 38 : bande tampon (© Canton d'Argovie)

Les bandes tampon ont aussi permis des réductions importantes. Au total, environ 1.2 millions de francs ont été versés aux agriculteurs pour ces diverses interventions via le projet phosphore, dont 77 % ont été financés par la Confédération.

Le projet phosphore s'est terminé en 2010 et des compensations financières ne sont donc plus prévues pour la réduction des apports de phosphore. De nouvelles dispositions en matière de phosphore sont entrées en vigueur le 1er janvier 2011 pour que les effets liés au projet phosphore soient durables<sup>18</sup>. Elles ne visent pas une réduction supplémentaire mais à garantir le succès à long terme des mesures mises en œuvre. Les apports en phosphore sont ainsi limités à 100% des besoins des plantes, contrairement aux 110% habituellement tolérés dans le cadre d'un bilan équilibré. Les trois autres mesures (semis direct, bandes tampons et désaffectation de surfaces

<sup>17</sup> Stöckli A. Dem Hallwilersee geht es immer besser. Umwelt Aargau 49, 2010

<sup>18</sup> Stöckli A. Hallwilersee – nachhaltige Gesundheit sicherstellen. Umwelt Aargau 69, 2015

drainées) sont toujours encouragées.

La diminution des concentrations de phosphore total dans le lac de Hallwil est visible sur la Figure 39. Depuis 2010, les concentrations varient entre 10 et 20 mg P/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à l'objectif initialement fixé.

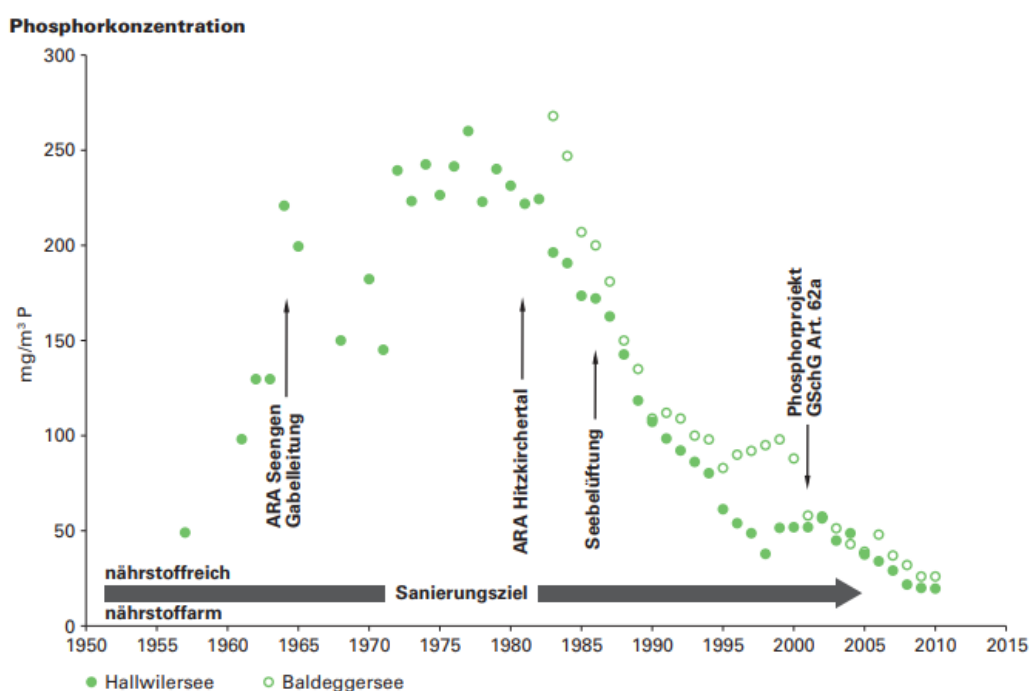


Figure 39 : Evolution des concentrations en phosphore total dans les lacs de Hallwil et de Baldegg de 1950 à 2015<sup>19</sup>.

### 5.2.2 Coûts des mesures de diminution des apports de phosphore vers le lac de Hallwil

Depuis 1984 et jusqu'en 2015, ce sont environ 10 millions de francs qui ont été dépensés pour les quatre étapes d'assainissement du lac de Hallwil. Au cours de cette même période, les flux de phosphore biodisponible d'origine diffuse ont diminué d'environ 3.5 t/an. Une estimation très sommaire donne ainsi un coût d'environ 3 mio de CHF par tonne de phosphore biodisponible diffus éliminée annuellement. A noter que ce montant comprend les coûts pour l'aération artificielle et la circulation forcée du lac.

### 5.3 Limites du modèle

Le modèle de calcul des flux pour l'état futur se veut lui aussi simple et facile d'utilisation. Il permet de simuler les flux à l'état futur en faisant varier un nombre restreint de paramètres influençant les rejets ponctuels de phosphore: le taux de croissance, l'année cible, le pourcentage d'ECP moyen, les normes de rejet des futures STEP régionales et les concentrations de rejet attendues pour les STEP non régionalisées. Les

<sup>19</sup> Stöckli A. Dem Hallwilersee geht es immer besser. Umwelt Aargau 49, 2010

résultats présentés précédemment ont été calculés sur la base de valeurs moyennes attendues pour ces paramètres. Ils pourront cependant être réajustés et différenciés au fur et à mesure que des données plus précises sont disponibles (par exemple après mise en service d'une nouvelle STEP : intégration des données sur les flux effectivement rejetés).

Les effets des mesures relatives à l'évacuation des eaux par temps de pluie n'ont pas été déterminés à l'aide du modèle. Les déversements ont été considérés comme constants, les cantons de Vaud et de Fribourg ne tolérant pas d'augmentation des déversements dans les projets de raccordements de stations d'épuration. Les mesures liées aux eaux pluviales (mise en séparatif, ouvrages de traitement spécifiques aux eaux pluviales, modifications dans le réseau, etc.) doivent être évaluées à l'aide d'approches spécifiques dans le cadre de la planification générale d'évacuation des eaux (PGEE) des communes.

Dans le cadre de cette étude, l'efficacité de mesures sur la partie diffuse n'a pas été évaluée. Au vu de l'importance de ce flux, il sera primordial de discuter de mesures visant à réduire ces apports.

## 6 CONCLUSIONS

La présente étude révèle que le flux de **phosphore biodisponible** vers le lac de Morat est en réalité plus élevé que les 13 t/an qui avaient été précédemment énoncées. Celui-ci se monte à un total de **18 t/an** en prenant en compte les apports atmosphériques. Le rapport de l'Eawag avait défini une **valeur cible de 11 t/an** pour permettre de ramener le lac de Morat à un état méso-eutrophe. Mais l'objectif final, tout comme la valeur légale, est de maintenir les concentrations en oxygène dans le lac au-dessus de 4 mg/l. Il se pourrait ainsi que la valeur cible de 11 t/an soit en réalité plus faible en raison de la capacité des algues à utiliser le phosphore de manière plus efficace lorsque ses concentrations diminuent ainsi qu'en raison du réchauffement climatique qui facilitera la croissance de la biomasse. Des réductions drastiques des flux de phosphore biodisponible vers le lac de Morat sont donc nécessaires pour atteindre l'objectif (diminution d'au minimum 7 t/an selon les connaissances actuelles, probablement davantage).

Les simulations de différentes performances d'abattement du phosphore pour les futures STEP régionalisées régionales (VOG, Seeland Sud, Moyenne Broye, Payerne, Basse Broye – Vully) ont permis d'identifier le gain potentiel pouvant être atteint par des mesures techniques poussées sur les STEP. Ce gain se monte à **maximum 2.6 t/an, soit une réduction de moitié du flux provenant des rejets de STEP**. Cette diminution correspondrait au respect d'une exigence de rejet fixée à 0.2 mg P/l sur les 5 STEP, **ce qui permettrait d'atteindre un tiers de l'objectif total de réduction nécessaire** et n'est donc pas négligeable.

Sur le plan technique, une telle diminution est possible et nécessite obligatoirement la mise en place d'une filtration sur sable. Or, cette mesure présente des synergies avec le traitement des micropolluants qui doit être mise en place sur ces mêmes STEP. En effet, le coût marginal d'un traitement plus poussé du phosphore sur des STEP traitant les micropolluants par un procédé avec filtres à sable est relativement faible et ne serait pas disproportionné sur le plan économique. Les chiffres présentés aux chapitres 5.1.4 et 5.2.2 révèlent que des mesures sur les STEP se révéleraient probablement plus chères que des mesures sur les apports diffus en l'absence de synergies avec l'introduction de l'étape d'élimination des micropolluants.

Sur le plan légal, il s'agira d'examiner si ces mesures - qui sont techniquement faisables et semblent économiquement proportionnées - doivent être assorties d'un renforcement de l'exigence de rejet pour le phosphore, au sens de l'art. 6 OEaux. Pour ce faire, il conviendra de vérifier si les exigences cumulatives de l'art. 6 al. 2 OEaux sont réunies.

Il faut encore relever qu'une telle exigence de rejet renforcée pourrait s'avérer impossible à respecter si les eaux usées présentent une forte proportion industrielle (ce qui est le cas pour plusieurs STEP du bassin versant du lac de Morat) en raison de la possible présence de phosphites. Les phosphites doivent en effet être oxydés en phosphates avant de pouvoir être précipités avec du fer. Certains microorganismes sont à même d'oxyder les phosphites en phosphates mais il est à l'heure actuelle peu clair si ces microorganismes sont présents dans les STEP communales et donc si les

phosphites peuvent être éliminés dans les STEP communales.

La mise en place d'un abattement poussé du phosphore sur les 5 STEP régionales présente un premier pas important (environ un tiers de l'objectif minimal à atteindre) mais une réduction des apports d'origine diffuse (qui sont à l'origine d'environ 60% des flux de phosphore biodisponible) d'au minimum 5 t/an restera nécessaire. Les progrès obtenus dans le bassin versant du lac de Hallwil sont encourageants et illustrent que des diminutions drastiques des apports de phosphore provenant de l'agriculture sont possibles et à des coûts comparables aux mesures sur l'épuration des eaux. Les indicateurs établis par Agridea ainsi que les extraits de cartes de MODIF-FUS livrent de premières indications sur les zones les plus critiques qui devraient être ciblées en priorité.

En résumé, les mesures techniques sur les STEP constituent un pas important mais ne suffiront pas à résoudre le problème du phosphore dans le lac de Morat. Il est donc essentiel d'entamer au plus tôt des discussions avec les services de l'agriculture afin d'envisager des mesures dans ce secteur également. D'autre part, la valeur cible des 11 t/an devra être confirmée à la lumière de ces derniers résultats et de l'état actuel des connaissances. Dans tous les cas, l'atteinte de cet objectif représentera un grand défi car la superficie du bassin versant du lac de Morat (700 km<sup>2</sup>) est très vaste par rapport à la taille du lac, exigeant des efforts considérables de toutes parts.

## 7 RECOMMANDATIONS

### 7.1 Monitoring et suivi du phosphore dissous

Le phosphore dissous représente au mieux la fraction biodisponible du phosphore dans les cours d'eau mais n'est actuellement pas mesuré dans les affluents du lac de Morat. Afin de pouvoir calculer des flux de phosphore biodisponible sur la base de réelles mesures et ensuite de pouvoir suivre dans le temps l'évolution des flux et l'effet d'interventions faites dans le bassin versant, il serait judicieux de commencer à mesurer ce paramètre dans le suivi physico-chimique des cours d'eau, en particulier aux stations de mesures situées aux points bas des sous bassins versants étudiés (stations de mesures mentionnées au chapitre 2.2.3). Il est également important d'avoir des données lors de périodes de pluie, périodes qui sont déterminantes pour l'apport de phosphore (voir chapitre 2.4). Il faudra ainsi rassembler un nombre conséquent de mesures avant de pouvoir déterminer un flux de phosphore dissous moyen annuel représentatif. Il pourrait ainsi être intéressant d'augmenter la fréquence des mesures effectuées par le canton de Fribourg afin de pouvoir obtenir un nombre représentatif de mesures plus rapidement.

### 7.2 Mesures en agriculture pour limiter les pertes diffuses

Nous recommandons d'ouvrir au plus tôt des discussions avec les milieux agricoles pour définir des mesures à mettre en place dans le bassin versant du lac de Morat. En parallèle, nous suggérons que les cantons concernés prennent contact avec l'OFEV pour discuter de cette problématique et de la possibilité de mettre en place un projet phosphore selon **l'Art. 62a de la LEaux ou selon l'Art. 77a de la LAgr**. L'exemple du lac de Hallwil montre qu'une telle démarche est de nature à obtenir une diminution importante des apports en phosphore. Il pourrait être intéressant d'établir dans un premier temps une zone pilote sur laquelle des mesures pourraient être mises en place et où les effets de ces dernières pourraient être observés relativement rapidement. L'établissement de **plans de fertilisation détaillés à la parcelle** pourrait être une piste intéressante à envisager. Ces plans de fumure ont l'avantage de prendre en compte à la fois les concentrations en phosphore déjà présentes dans les sols de la parcelle et les valeurs effectives en phosphore contenues dans les engrais de ferme, ce que les bilans de fumure ne permettent pas de faire. Des **améliorations des aspects constructifs** des installations telles que places de transbordement, aires d'exercices, courettes, silos, ... pour limiter les apports de purin et/ou fumier dans les eaux de surface pourraient également entraîner une réduction importante des apports en phosphore dans les eaux.

Dans le cadre de la définition de mesures liées au ruissellement, il est proposé d'utiliser la nouvelle carte illustrant les risques potentiels liés au ruissellement, récemment publiée. Cette carte a été établie avant tout dans une optique de dangers naturels (planification de mesures de protection) mais traite également des surfaces non bâties. Elle pourrait ainsi permettre d'identifier des zones particulièrement à risque en



matière de ruissellement, qui est à l'origine d'environ 50% des apports diffus de phosphore et devrait être considérée comme un outil pour cibler des zones d'action.

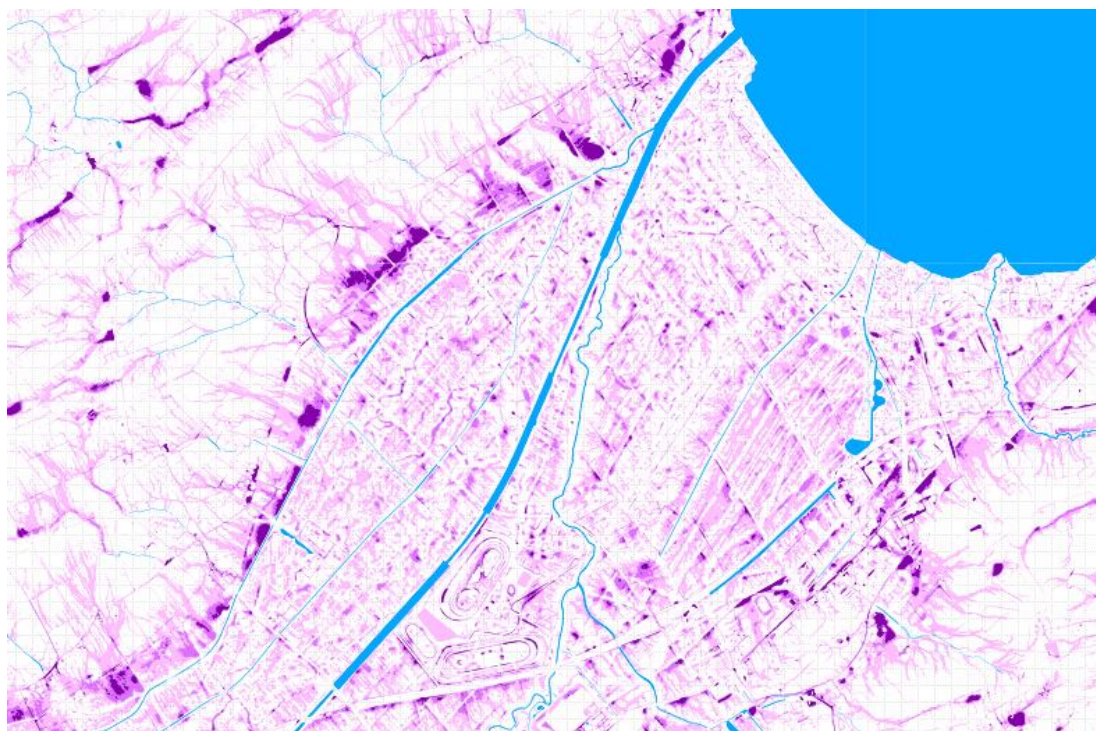


Figure 40 : Extrait de la carte de l'aléa ruissellement (secteur Saint-Aubin – Bellerive – Avenches) ([www.geo.admin.ch](http://www.geo.admin.ch) © swisstopo).

### 7.3 Traitement renforcé du phosphore sur les STEP régionales, planification régionale

Il est proposé de mettre en place des mesures techniques (filtration finale) pour un abattement poussé du phosphore, ceci pour les 5 STEP régionalisées du bassin versant (Ecublens VOG (FR), Lucens, Payerne, Basse-Broye-Vully (site non encore connu), Morat). Ces mesures pourront être mises en place en synergie avec le traitement des micropolluants (qui constitue une obligation légale pour ces 5 STEP).

De cette façon, une diminution significative (environ un tiers de l'objectif minimal à atteindre) des apports en phosphore biodisponible vers le lac de Morat pourra être atteinte par rapport à la situation actuelle, malgré le développement démographique du bassin versant et dans un horizon de temps relativement court. Le respect de cette exigence est réalisable sur le plan technique. De plus, les premiers résultats pourront être observés déjà rapidement (d'ici 3-4 ans) avec la mise en service des nouvelles STEP de Morat et du VOG, qui devraient amener une baisse d'environ 800 kg/an. Les autres STEP régionales devraient être mises en service à partir de 2025.

La synergie de cette mesure avec le traitement des micropolluants soulève la question du calcul des coûts imputables pour le financement fédéral au sens de l'art. 61a LEaux. Il est recommandé aux services cantonaux concernés (SEn et DGE) de mettre en place une concertation avec l'OFEV, dans une perspective de planification à l'échelle du bassin versant du Lac de Morat. On peut par ailleurs se demander si la

présente démarche ne devrait pas s'inscrire dans une planification de type PREE (art. 4 OEaux al. 1 : « *Les cantons veillent à établir un plan régional de l'évacuation des eaux (PREE) lorsque, pour assurer une protection efficace des eaux dans une région limitée formant une unité hydrologique, les mesures de protection des eaux prises par les communes doivent être harmonisées.* »).

#### **7.4 Amélioration du suivi des déversements provenant des réseaux**

Les déversements provenant des réseaux sont peu documentés dans le bassin versant de la Broye.

Dans un premier temps et dans le cadre des mises à jour des PGEE communaux ou régionaux, il serait pertinent d'évaluer plus précisément ces déversements au moyen de simulations spécifiques et/ou de mesures. Ensuite, des mesures de réduction de ces déversements pourront être préconisées par le PGEE (par exemple : bassins d'eau pluviale, réduction des surfaces imperméables raccordées au réseau), pour autant que le rapport coût-efficacité de ces mesures soit judicieux.

#### **7.5 Remise à jour de la valeur cible en phosphore pour le lac de Morat**

Une étude de l'Eawag, dont nous avons pris connaissance par M. Müller lors de la séance du 10 septembre 2018, est actuellement en cours afin d'apporter des précisions sur l'évolution des rapports limites C:P pour les bactéries lorsque les concentrations en phosphore diminuent. Une actualisation de l'objectif pour le lac de Morat sera à envisager lorsque les résultats seront disponibles.

Ecublens (VD), le 6 septembre 2019

L. Schneider / J. Schweizer

HOLINGER SA

Jürg Schweizer  
Directeur de succursale

Michael Mattle  
Chef de projet

## **Annexe 1**

### Périmètre d'étude et découpage des sous bassins versants

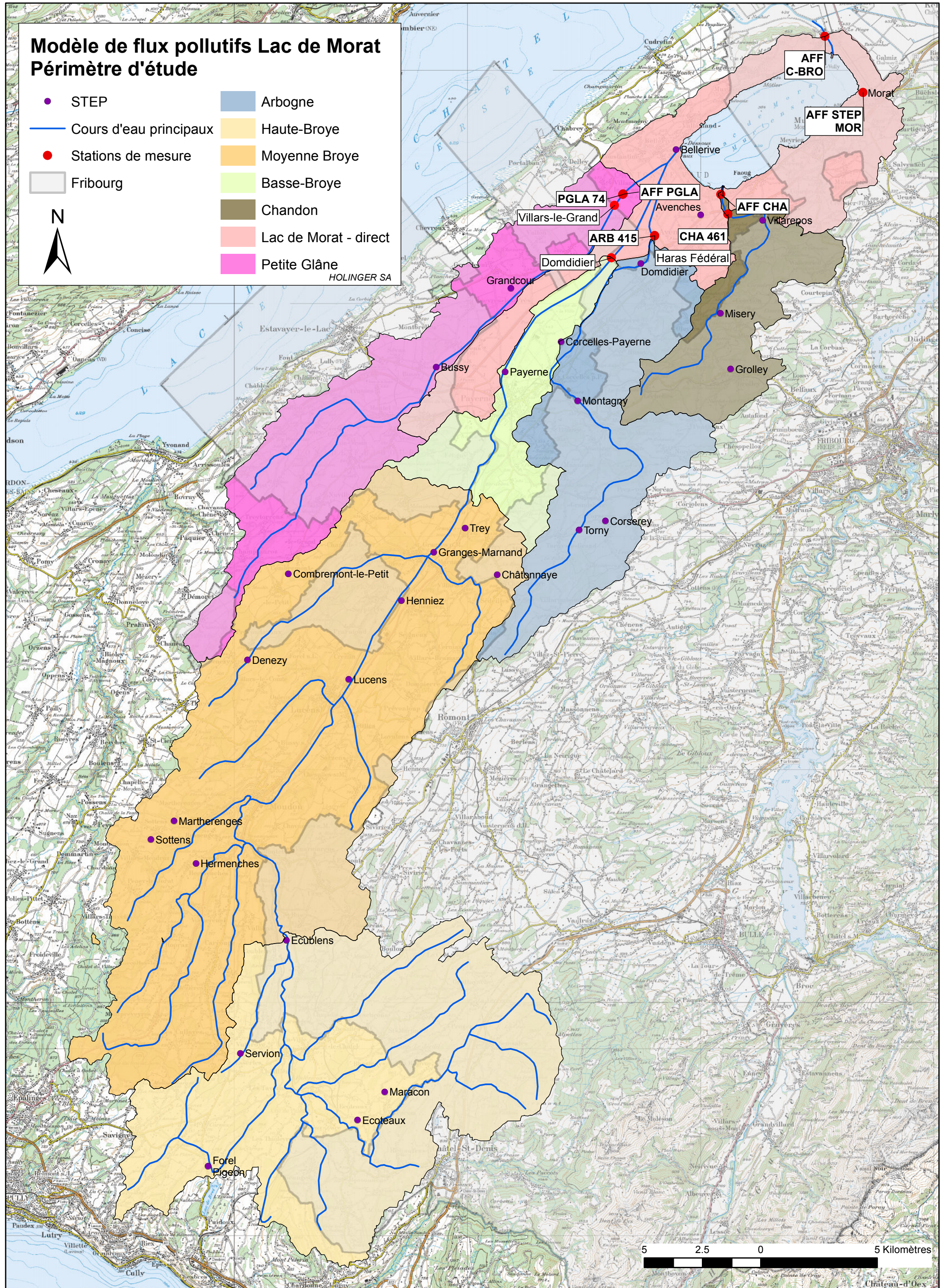
# Modèle de flux polluifs Lac de Morat

## Périmètre d'étude

- STEP
- Cours d'eau principaux
- Stations de mesure
- Fribourg
- Arbogne
- Haute-Broye
- Moyenne Broye
- Basse-Broye
- Chandon
- Lac de Morat - direct
- Petite Glâne



HOLINGER SA



## **Annexe 2**

### Caractéristiques et flux des STEP du bassin versant

Modèle de flux polluants pour le bassin versant du lac de Morat - liste des STEP

N°	Nom de la STEP	Canton	EH	Débit journalier	Débit annuel	Ptot déversé	Régionalisation	Flux moyens [kg/an]		Pourcentage du total	
								Ptot	PO4	Ptot	PO4
1	Maracon	VD	158	39	14'347	1	VOG	3	0.5	0.06%	0.02%
2	Ecoteaux	VD	528	103	37'504	4	VOG	19	5.3	0.37%	0.24%
3	Forel Chercottaz	VD	278	84	30'559	2	Autres	8	3.0	0.16%	0.14%
4	Savigny Pra Charbon	VD	3'585	1'300	474'551	25	Autres	92	40.8	1.83%	1.85%
5	Forel Pigeon	VD	1'479	485	177'096	10	Autres	112	81.0	2.22%	3.67%
6	Servion	VD	2'232	685	250'090	16	Autres	73	34.9	1.44%	1.58%
7	Ecublens	FR	29'633	4'721	1'723'105	207	VOG	825	508.4	16.31%	23.05%
8	Hermenches	VD	351	58	20'998	2	Moyenne Broye	19	2.5	0.38%	0.12%
9	Sottens	VD	949	161	58'775	7	Autres	81	33.0	1.60%	1.50%
10	Martherenges	VD	81	19	6'935	1	Autres	3	1.1	0.05%	0.05%
11	Lucens	VD	43'000	4'745	1'732'084	301	Moyenne Broye	775	240.1	15.33%	10.88%
12	Henniez	VD	7'077	1'118	408'161	50	Moyenne Broye	92	16.6	1.82%	0.75%
13	Châtonnaye	FR	1'405	187	68'115	10	Moyenne Broye	41	5.7	0.80%	0.26%
14	Denezy	VD	145	25	9'034	1	Autres	4	1.0	0.08%	0.05%
15	Combrement-le-Petit	VD	672	129	46'953	5	Moyenne Broye	64	6.4	1.26%	0.29%
16	Granges-Marnand	VD	3'213	610	222'468	22	Moyenne Broye	234	42.8	4.63%	1.94%
17	Trey	VD	659	100	36'459	5	Moyenne Broye	20	6.7	0.40%	0.31%
18	Payerne	VD	18'617	3'756	1'370'818	130	Payerne	613	422.2	12.12%	19.14%
19	Corcelles-près-Payerne	VD	2'449	695	253'553	17	Payerne	187	33.7	3.69%	1.53%
20	Bussy	FR	8'467	2'088	762'115	59	Payerne	345	131.4	6.82%	5.96%
21	Grandcour	VD	1'686	282	102'971	12	Payerne	74	49.6	1.47%	2.25%
22	Torny	FR	883	112	41'027	6	Payerne	16	6.1	0.32%	0.28%
23	Corserey	FR	401	80	29'318	3	Payerne	12	4.7	0.24%	0.21%
24	Montagny	FR	2'683	509	185'939	19	Payerne	56	21.4	1.11%	0.97%
25	Domdidier	FR	10'392	3'236	1'180'984	73	BBV	556	211.6	10.99%	9.59%
26	Grolley	FR	3'300	837	305'425	23	BBV	137	52.2	2.71%	2.37%
27	Misery	FR	1'558	154	56'158	11	BBV	22	8.5	0.44%	0.38%
28	Villarepos	FR	808	272	99'280	6	BBV	38	14.6	0.76%	0.66%
29	Avenches	VD	6'350	1'206	440'177	44	BBV	125	65.1	2.46%	2.95%
30	Bellerive	VD	2'553	639	233'364	18	BBV	54	19.5	1.08%	0.88%
31	Morat	FR	38'917	4'638	1'692'923	272	Morat	356	135.6	7.04%	6.15%
	<b>Somme</b>		<b>194'509</b>	<b>37'913</b>	<b>13'838'203</b>	<b>1'362</b>		<b>5'058</b>	<b>2'206</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

## **Annexe 3**

Carte des flux de phosphore dissous diffus par hectare

# Modèle de flux polluifs Lac de Morat

## Légende

- STEP
  - Cours d'eau principaux
  - Flux de phosphore dissous [kg / ha \* an]
- |               |           |
|---------------|-----------|
| Arbogne       | 0 - 0.6   |
| Haute-Broye   | 0.6 - 0.8 |
| Moyenne Broye | 0.8 - 1   |
| Basse-Broye   | > 1.0     |
| Chandon       |           |
| Lac de Morat  |           |
| Petite Glâne  |           |



HOLINGER SA

