

Etude préalable au lancement d'une analyse « Hydrologie, Milieu, Usages et Climat » sur le bassin de la Sioule (pré-HMUC)

Phase 4c : Analyse complémentaire plans d'eau
Résultats des mesures 2023-2024 et interprétation
concernant l'impact des plans d'eau

Rapport provisoire

FICHE DE SYNTHESE

Etude préalable au lancement d'une analyse « Hydrologie, Milieu, Usages et Climat » sur le bassin de la Sioule (pré-HMUC)

Phase 4c : Analyse complémentaire plans d'eau – Instrumentation 2023-2024

		2, Quai de Fort Maleaume CS 55708 45 057 ORLEANS Cedex		
		Lise LANCELOT – Chargée de mission		
		07 50 67 41 75		lise.lancelot@eptb-loire.fr

VOS CONTACTS EODD

Responsable
de projet

Thierry DROIN
t.droin@eodd.fr
0670723564

Supervision

Thierry DROIN

Libération

Thierry DROIN



Agence de Saint-Etienne

contact@eodd.fr | Tél : 04.72.76.06.90

CONTRAT EODD N° P08971

Date	Indice	Modifications
14/05/2025	1	Edition initiale
27/05/2025	2	Prise en compte des remarques du MOA (21/05/25)

SOMMAIRE

1.	Liste des acronymes.....	4
2.	Introduction et contexte général de l'étude	5
2.1	Contexte et problématique	5
2.2	Objectifs et phasage de l'étude	6
3.	Objectifs spécifiques de la phase d'étude.....	7
4.	Descriptions des sites d'études	8
4.1	Localisation	8
4.2	Contexte hydrographique	10
4.2.1	Site de Lapeyrouse	10
4.2.2	Site de Gouttières	12
4.3	Géologie.....	15
4.3.1	Site de Lapeyrouse	15
4.3.2	Site de Gouttières	16
4.3.3	Synthèse et conséquence sur le fonctionnement hydrologique	16
4.4	Occupation du sol	18
4.4.1	Site de Lapeyrouse	18
4.4.2	Site de Gouttières	19
4.5	Synthèse	20
5.	Description des suivis mis en œuvre.....	20
5.1	Points de suivis et mesures associées	20
5.2	Suivi hydrologique en continu	23
5.3	Suivi en continu (oxygénation et température des eaux - météorologie - évaporation)..	25
5.3.1	Suivi oxygène dissous - Température	25
5.3.2	Suivi météorologique.....	25
5.3.3	Suivi Evaporation	26
5.4	Suivi physico-chimique ponctuel – Analyses laboratoire	26
5.5	Période de suivi	26
6.	Résultats des suivis et principaux enseignements.....	27
6.1	Conditions hydroclimatiques pendant la période de suivi	27
6.1.1	Conditions climatiques.....	27
6.1.2	Conditions hydrologiques	28
6.2	« Météorologie » - Données collectées et interprétation	29
6.2.1	Site de Lapeyrouse	29
6.2.2	Site de Gouttières	33
6.3	« Evaporation » - Données collectées et interprétation.....	37
6.3.1	Méthode d'évaluation	37
6.3.2	Site de Lapeyrouse	40
6.3.2.1	Résultats obtenus à partir des données climatiques.....	40
6.3.2.2	Mesures réalisées sur le bac d'évaporation	42
6.3.3	Site de Gouttières	44
6.3.3.1	Résultats obtenus à partir des données climatiques.....	44

6.3.3.2	Mesures réalisées sur le bac d'évaporation	46
6.3.4	Synthèse.....	47
6.4	Bilan hydroclimatique.....	48
6.4.1	Méthode de calcul	48
6.4.2	Application à la zone d'étude	51
6.5	« Hydrologie » - Données collectées et interprétation	54
6.5.1	Reconstitution des débits aux points de mesure.....	54
6.5.2	Présentation des résultats - Site de Lapeyrouse.....	55
6.5.3	Présentation des résultats - Site de Gouttières	59
6.5.4	Synthèse.....	62
6.6	« Qualité des eaux » - données collectées et interprétation	65
6.6.1	Site de Lapeyrouse	65
6.6.1.1	Oxygène dissous – Suivi en continu.....	65
6.6.1.2	Température – Suivi en continu	67
6.6.1.3	Ammonium	68
6.6.1.4	Nitrates.....	69
6.6.1.5	Nitrites	70
6.6.1.6	Azote Kjeldahl (NTK)	70
6.6.1.7	Phosphore	71
6.6.1.8	Matière en suspension	72
6.6.1.9	Acidité -pH.....	72
6.6.1.10	Synthèse – Secteur Lapeyrouse	73
6.6.2	Site de Gouttières	73
6.6.2.1	Oxygène dissous – Suivi en continu.....	73
6.6.2.2	Température – Suivi en continu	75
6.6.2.3	Ammonium	76
6.6.2.4	Nitrates.....	76
6.6.2.5	Nitrites	77
6.6.2.6	Azote Kjeldahl (NTK)	77
6.6.2.7	Phosphore	78
6.6.2.8	Matières en suspension.....	79
6.6.2.9	Acidité - pH	79
6.6.2.10	Synthèse – Site de Gouttières	80
7.	Bilan et conclusions	81

TABLEAUX

<i>TABLEAU 1 : POINTS DE SUIVI (TERMINOLOGIE ET METROLOGIE)</i>	<i>21</i>
<i>TABLEAU 2 : PERTES PAR EVAPORATION SUR LA SURFACE DES PLANS D'EAU SUR LA PERIODE SEPTEMBRE 2023-OCTOBRE 2024</i>	<i>48</i>
<i>TABLEAU 3 : COEFFICIENT CULTURAL (KC) POUR UNE PRAIRIE DE GRAMINEES</i>	<i>49</i>
<i>TABLEAU 4 : GAMME DE DEBIT (ET INDIRECTEMENT DE HAUTEUR DEVERSE) POUR LAQUELLE DES MESURES DE DEBIT AU COURANTOMETRE ONT ETE REALISEES</i>	<i>54</i>
<i>TABLEAU 5 : ECOULEMENT EN SITUATION D'ETIAGE SEVERE (ETE 2023)</i>	<i>58</i>
<i>TABLEAU 6 : DEBITS SPECIFIQUES EN ETIAGE</i>	<i>62</i>

1. Liste des acronymes

ORDRE ALPHABETIQUE	ACRONYME	SIGNIFICATION
C	CLE	Commission Locale de l'Eau
D	DCE	Directive Cadre sur l'Eau
H	HMUC	Hydrologie Milieux Usages Climat
S	SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
	SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

2. Introduction et contexte général de l'étude

2.1 Contexte et problématique

La présente étude concerne le territoire du **Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) Sioule**, qui couvre une superficie d'environ 2 500 km², et intègre la Sioule et l'ensemble de ses affluents, de sa source à sa confluence avec l'Allier.

Le périmètre d'étude concerne trois départements (Puy-de-Dôme, Allier et Creuse) et intègre 33 masses d'eau « cours d'eau », 3 masses d'eau « plan d'eau » et 5 masses d'eau souterraines.

Cette étude s'inscrit dans les nouvelles orientations du **SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027** qui vise notamment à renforcer la prise en compte de la gestion quantitative dans l'adaptation au changement climatique, en confortant le rôle des études HMUC (Hydrologie, Milieux, Usages, Climat) comme bases techniques permettant d'adapter les modalités de gestion des ressources en eau aux spécificités du territoire.

Elle fait suite au constat d'une accentuation des étiages sévères (voire d'assecs sur certains secteurs), plus fréquents et plus longs, sur la Sioule et un de ses principaux affluents la Bouble, mais aussi au niveau de très nombreux affluents y compris sur leur partie amont.

Le nouveau SDAGE 2022-2027 a ainsi reclassifié le bassin de la Sioule en **territoire où il est nécessaire de prévenir l'apparition d'un déficit quantitatif via un plafonnement des prélèvements** (disposition 7B-3).

C'est dans ce cadre et suite à ce constat que la CLE du SAGE Sioule a revu sa position et affirmé sa volonté de réaxer davantage sa politique future autour des enjeux quantitatifs, considérant que les actions sur les milieux visant à améliorer leur résilience ne seront efficaces qu'avec une ressource en eau suffisante.

Pour anticiper au mieux cette situation et d'éventuels conflits d'usages faisant suite à un affaiblissement des ressources, la CLE souhaite ainsi se doter d'une analyse HMUC approfondie. Dans un premier temps, elle a toutefois jugé pertinent d'**engager une étude préalable, destinée à préciser les conditions et modalités de réalisation de l'étude HMUC.**

2.2 Objectifs et phasage de l'étude

Les objectifs de l'étude sont ainsi les suivants :

- 1) Analyser/simuler l'application des dispositions du chapitre 7 du SDAGE sur le bassin de la Sioule
- 2) Identifier les enjeux, les objectifs et les attentes des acteurs auxquels l'analyse HMUC devra répondre ;
- 3) Établir un état des lieux des connaissances disponibles et de celles à acquérir ;
- 4) Acquérir les données de bases complémentaires indispensables sur l'hydrologie, les besoins en eau pour le bon fonctionnement des milieux, et analyse l'impact des plans d'eau ;
- 5) Rédiger le cahier des charges de la future analyse HMUC Sioule.

L'étude se déroule en 5 phases :

- Phase 1 : Simulation de l'application du chapitre 7 du SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027 ;
- Phase 2 : Identification des enjeux, des objectifs et des attentes des acteurs ;
- Phase 3 : État des lieux des connaissances disponibles et de celles à acquérir ;
- Phase 4 : Acquisition de données :
 - 4a : Bancarisation de données hydrologiques et hydrogéologiques ;
 - 4b : Détermination des besoins des milieux ;
 - 4c : Analyse complémentaire plans d'eau : volet hydrologie et volet qualité
- Phase 5 : Rédaction du cahier des charges HMUC Sioule.

Le présent document concerne la phase 4c de l'étude en lien avec l'impact des plans d'eau sur le volet hydrologie et qualité.

Il rend compte des conclusions issues de l'instrumentation de plusieurs sites de plans d'eau sur les communes de Lapeyrouse et de Gouttières (63).

3. Objectifs spécifiques de la phase d'étude

Faisant suite à un inventaire et une actualisation de la base de données des plans d'eau sur le territoire, et conformément au CCTP établi par l'EPL, quatre sites ont fait l'objet d'une instrumentation pour un suivi lors d'un cycle hydrologique annuel.

Les deux sites retenus se situent sur les communes de Lapeyrouse (site n°1) et de Gouttières (site n°2).

Sur chaque site, deux bassins versants sont instrumentés :

- le premier est potentiellement influencé par la présence de nombreux plans d'eau (= **bassin versant « plan d'eau »**)
- alors que le second peut être associé à un bassin versant sans cet usage (= **bassin versant « témoin »**).

Les mesures et suivis mis en œuvre, entre la fin de l'été 2023 et la fin d'année 2024 ont pour objectifs d'évaluer plus précisément les incidences quantitative (débit, bilan en eau) et qualitative (évolution de la qualité physico-chimique) des plans d'eau sur les cours d'eau, en se basant sur un référentiel local propre au bassin versant de la Sioule.

4. Descriptions des sites d'études

4.1 Localisation

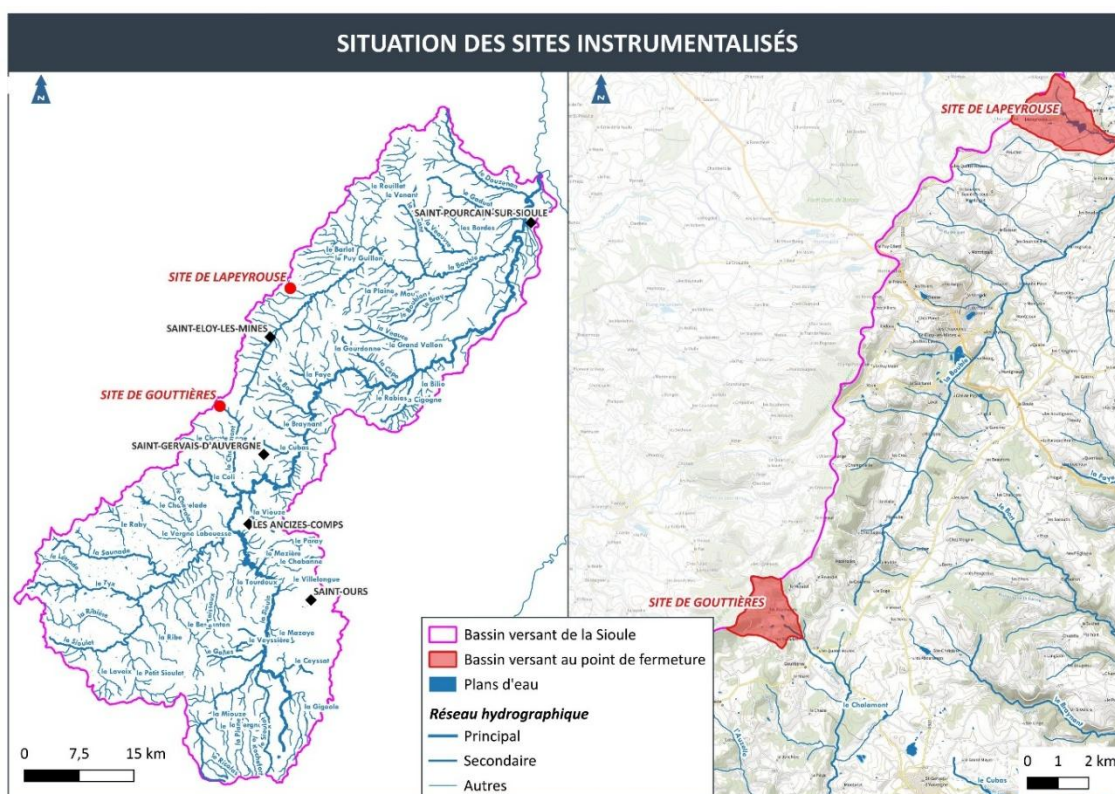
Les sites retenus représentent deux grandes typologies de plans d'eau pouvant être rencontrées sur le bassin versant de la Sioule :

- Site de Lapeyrouse : Plans d'eau de grande superficie disposant d'aménagements permettant de respecter les prescriptions réglementaires liés par exemple au débit réservé (vidange par « moine »).
- Site de Gouttières : Plans d'eau de petite superficie fonctionnant uniquement par surverse sans dérivation latérale.

Les deux sites sont distants d'environ 20 km et se situent en tête de bassin versant sur la crête orientale du bassin versant de la Sioule :

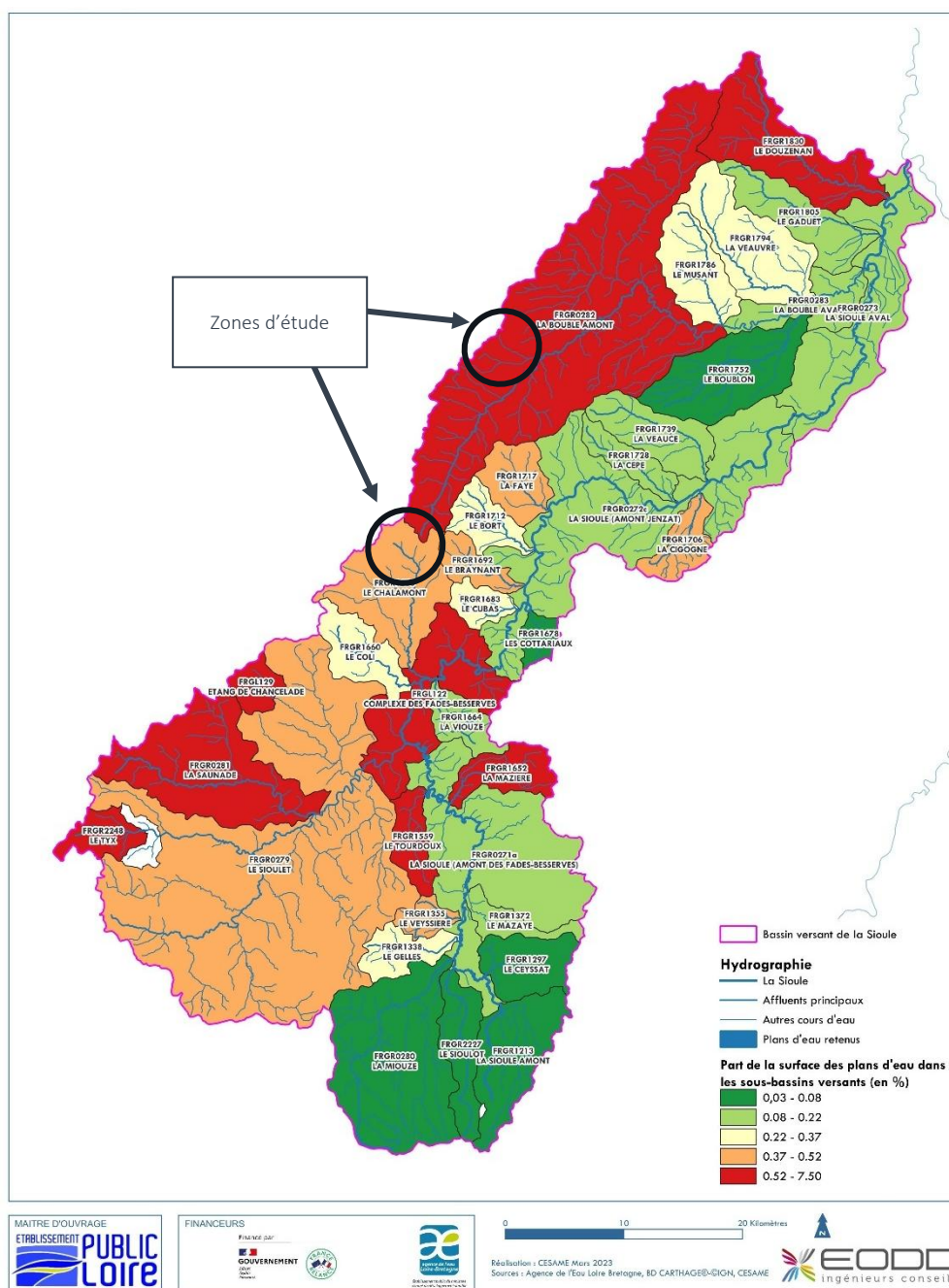
Le site de Gouttières appartient au bassin versant du Chalamont (affluent de la Sioule) et celui de Lapeyrouse à celui de la Boule.

Illustration 1 : Localisation générale des sites d'étude



Ces deux zones se situent dans des secteurs où le nombre de plans d'eau est important et où la surface en eau par rapport à la taille des bassins des cours d'eau présente les ratios les plus importants sur le bassin versant de la Sioule (voir illustration suivante)

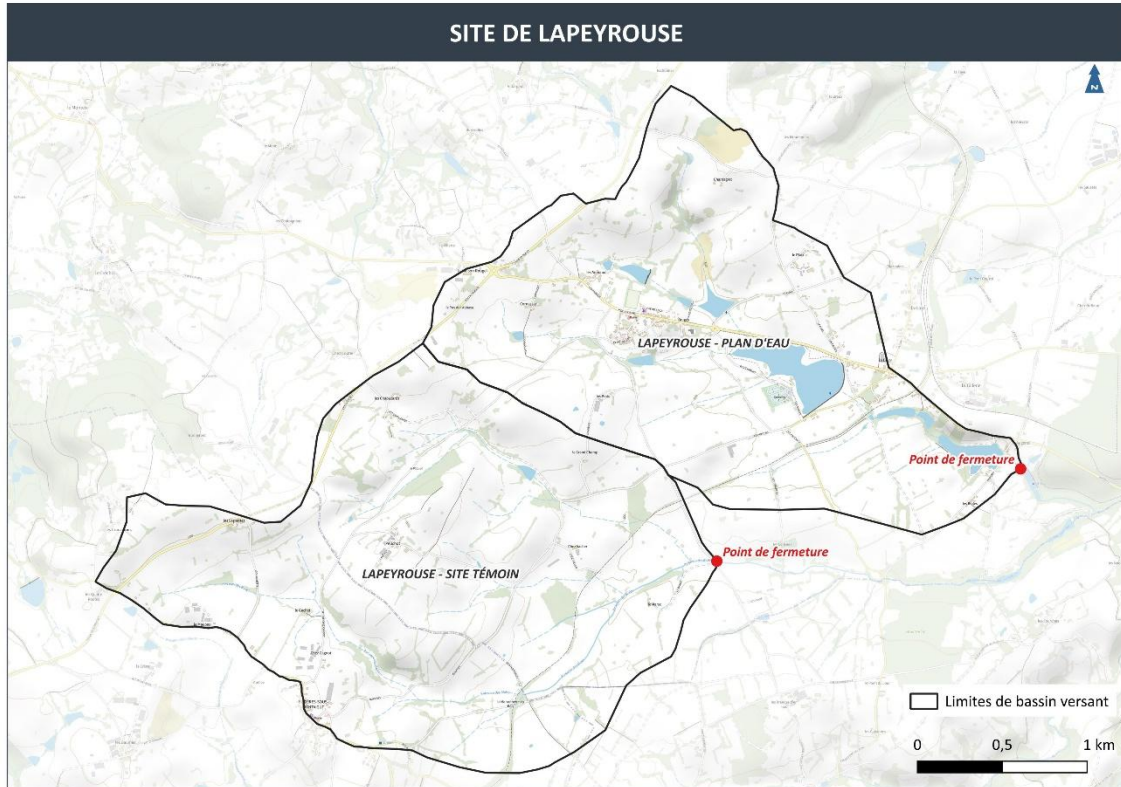
Illustration 2 : Indicateur de pression "plans d'eau" - Bassin versant de la Sioule



4.2 Contexte hydrographique

4.2.1 Site de Lapeyrouse

Illustration 3 : Zone d'étude - Site de Lapeyrouse



Les deux bassins versants étudiés présentent des similitudes au regard de leur taille (450 ha pour « plan d'eau » et 524 ha pour « témoin »), de leur altimétrie (entre 590 et 490 m NGF) et de l'occupation du sol (contexte rural).

- **Bassin versant « plan d'eau »**

Le bassin versant « plan d'eau » présente un total de 9 plans d'eau pour une surface totale cumulée en eau de 18,25 ha, ce qui représente 4% de la superficie totale du bassin versant étudié.

Ces plans d'eau, d'origine artificielle, ne présentent aucune dérivation latérale du cours d'eau. Ils sont tous positionnés directement sur l'axe hydrographique, sur un affluent rive gauche du ruisseau des Biles.

Illustration 4 : Vue aérienne - Plans d'eau – Site de Lapeyrouse



Le plus grand plan d'eau sur ce territoire est le plan d'eau communal (P.E.6) à usage de loisirs qui couvre une superficie d'environ 11 ha.

Ce plan d'eau dispose d'un ouvrage de vidange de type « moine » permettant d'assurer la restitution d'écoulements vers l'aval. Le marnage annuel constaté sur la période de suivi atteint environ 70 cm.

Ce plan d'eau dispose également d'un déversoir d'orage sur un des flancs de la digue. La restitution des écoulements en aval du plan d'eau se fait dans un canal béton situé juste en aval. Ce canal reçoit les eaux du dispositif de drainage de la digue qui présentent la particularité de générer des dépôts d'hydroxydes de fer traduisant la faible oxygénation de ce type d'écoulement.

On précisera que l'autre plus gros plan d'eau situé en aval (P.E.9), présente également un dispositif de type « moine » pour la gestion des écoulements. C'est à environ 150 m en aval de ce dernier plan d'eau qu'a été positionnée la fermeture de la zone d'étude (voir Illustration 13 et Illustration 4), qui se situe juste en amont de la station d'épuration communale (lagunage).

Illustration 5 : Photographies - Plan d'eau de Lapeyrouse

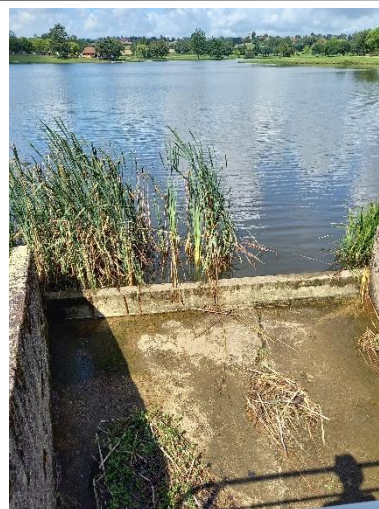




Moine



Canal de restitution



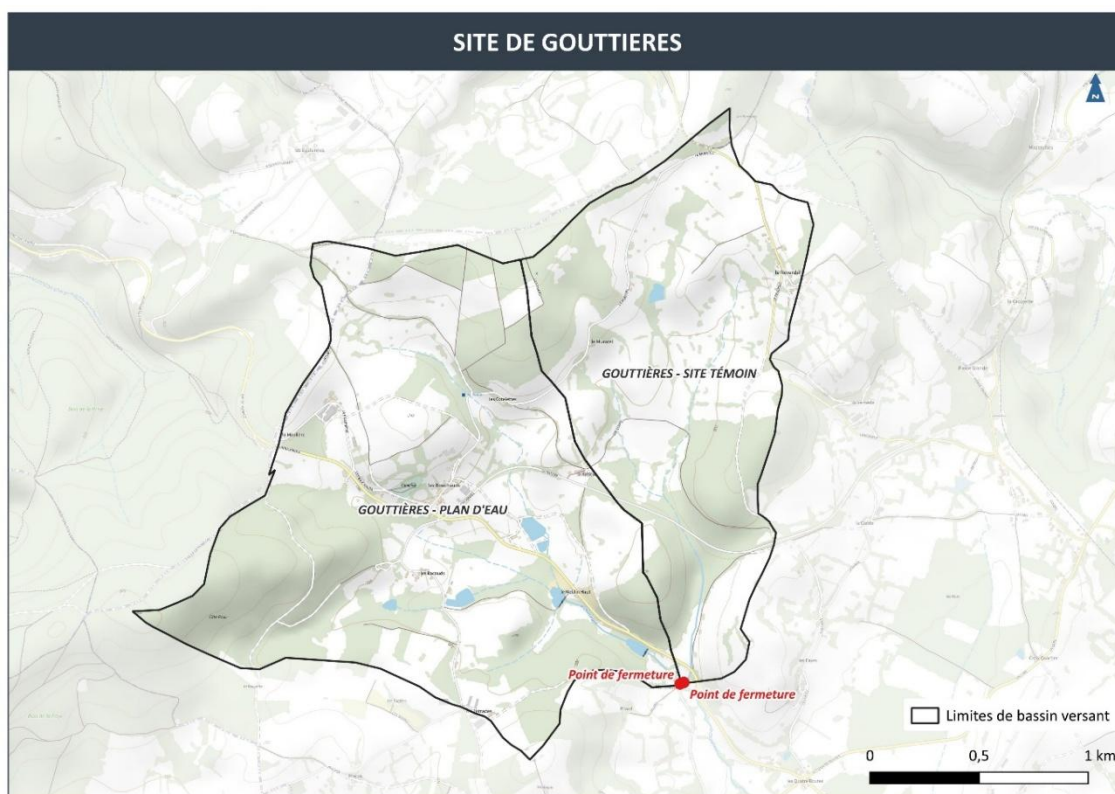
Déversoir d'orage

- Bassin versant « témoin »

Sur ce territoire, seul un petit plan d'eau est référencé avec une surface en eau inférieure à 0,5 ha (voir Illustration 13).

4.2.2 Site de Gouttières

Illustration 6 : Zone d'étude - Site de Gouttières



Les deux bassins versants étudiés présentent des similitudes au regard de leur taille (310 ha pour « plan d'eau » et 197 ha pour « témoin »), de leur altimétrie (entre 800 et 650 m NGF) et de l'occupation du sol (contexte rural).

- **Bassin versant « plan d'eau »**

Il s'agit de plans d'eau situés en tête du bassin versant du Chalamont. Sur la zone d'étude, on recense 6 plans d'eau de taille comprise entre 0,16 et 0,72 ha, pour une surface totale cumulée en eau de 2,2 ha. L'emprise des plans d'eau représente 0,7 % de la superficie totale du bassin versant étudié. Ces plans d'eau, d'origine artificielle, ne présentent aucune dérivation latérale du cours d'eau. Ils sont tous positionnés directement sur l'axe hydrographique.

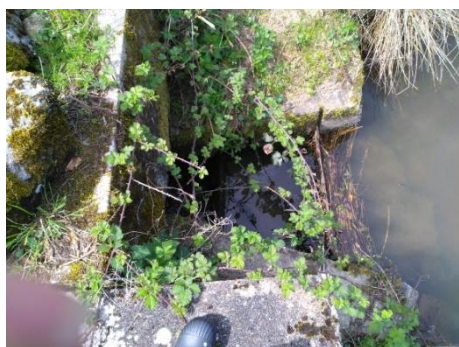
Illustration 7 : Vue aérienne - Plan d'eau de Gouttières



Le plan d'eau le plus important (P.E.1) se situe à proximité du lieu-dit Les Bouchauds (voir Illustration 13), il couvre une superficie d'environ 0,7 ha. La digue présente une hauteur d'environ 5 m. L'évacuation des eaux se fait par surverse latérale (ouvrage en pierre positionné sur la rive droite). Le plan d'eau dispose également d'un déversoir d'orage (cadre béton).

Illustration 8 : Photographie – Plan d'eau de Gouttières





Surverse



Déversoir d'orage

- Bassin versant « témoin »

Sur ce territoire, seul un petit plan d'eau est référencé avec une surface en eau inférieure à 0,35 ha (voir Illustration 6).

4.3 Géologie

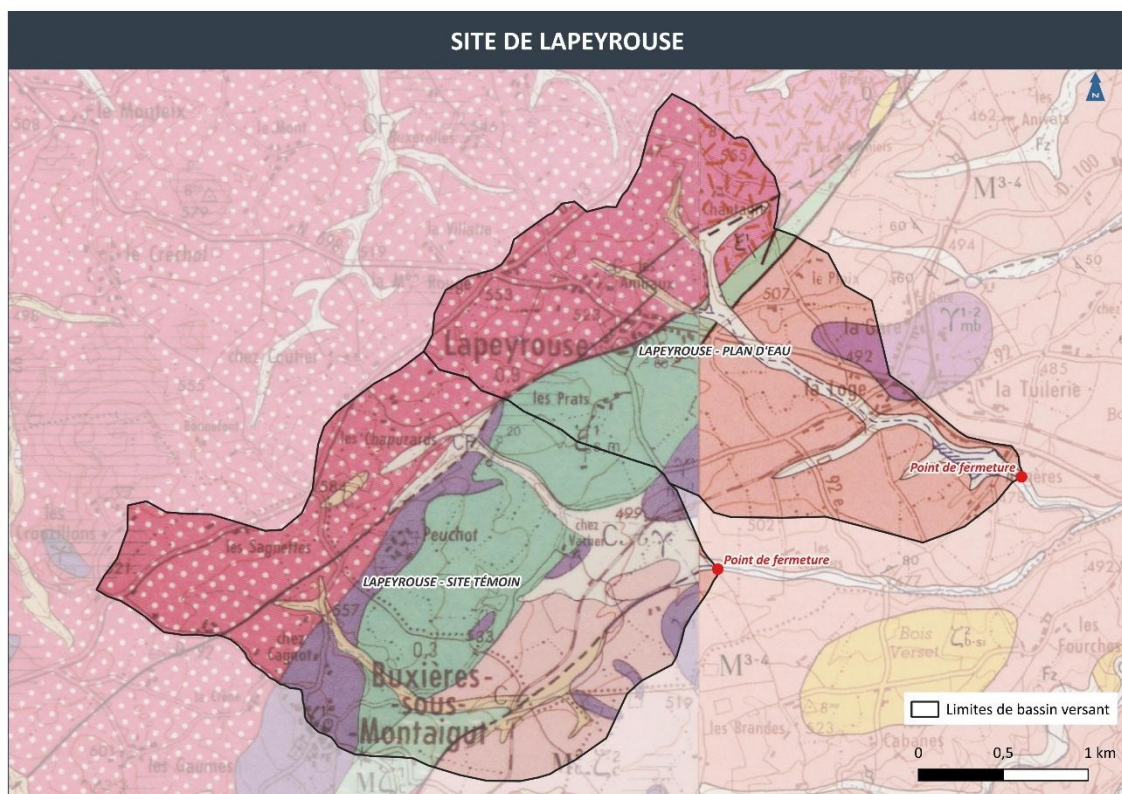
4.3.1 Site de Lapeyrouse

Sur le site de Lapeyrouse, deux types de formations géologiques sont présentes :

- La formation plutonique granitique (socle hercynien), sur le haut des deux bassins versants.
- Les formations métamorphiques (en majorité des gneiss, schistes, migmatites) localisées sur les parties basses des deux bassins versants.

Les deux bassins versants étudiés (« plan d'eau » et « témoin ») sont similaires géologiquement.

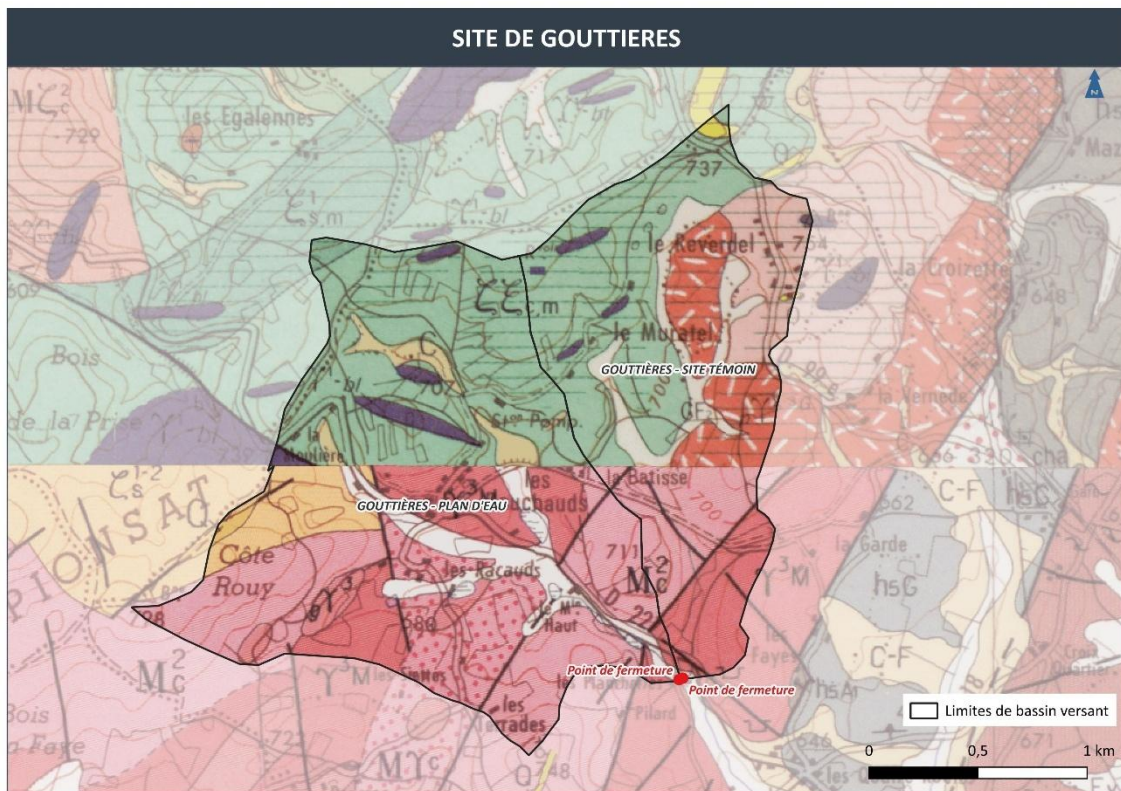
Illustration 9 : Contexte géologique - Site de Lapeyrouse



4.3.2 Site de Gouttières

Sur le site de Gouttières, la formation métamorphique est principalement localisée sur les parties hautes des bassins versants, représentant la grande majorité de l'espace étudié. Elle est composée principalement de gneiss et de schistes. Le bas du bassin versant est constitué du socle hercynien représenté par une formation granitique.

Illustration 10 : Contexte géologique - Site de Gouttières



4.3.3 Synthèse et conséquence sur le fonctionnement hydrologique

Les formations métamorphiques et plutoniques sont par nature peu perméables et n'offrent que très peu de ressources aquifères. En termes de comportement hydrogéologique, des écoulements souterrains sont possibles :

- dans le réseau de fracturation de la roche (porosité de fracturation), notamment au niveau des grands accidents tectoniques (réseau de fractures liées à la mise en place des structures filoniennes). Ce phénomène qui reste très localisé peut conditionner certaines directions d'écoulements et de drainage vers le réseau hydrographique ;
- dans la frange d'altération superficielle de la roche (arène) qui peut être le siège de développement d'aquifères peu profonds et réduits. L'existence de ces écoulements sous-cutanés est principalement liée à la nature et à l'épaisseur de l'altération. En effet, plus les matériaux d'altération sont de nature sableuse (cas par exemple des formations plutoniques granitiques), plus les possibilités d'infiltration et de circulations souterraines sont significatives. Dans ce cas de figure, les écoulements ont tendance à se faire au contact du rocher sain à la base de la frange altérée. Le réseau hydrographique est alimenté alors par le lent ressuyage de ces nappes d'arène superficielle.

Au droit des formations métamorphiques (gneiss et schistes), les sols rencontrés sont beaucoup moins sableux et essentiellement de texture argilo-limoneuse peu favorables à l'infiltration des eaux météoriques.

Dans de tels contextes géologiques, avec des formations rocheuses imperméables en grand, le bassin versant hydrogéologique est toujours très proche du bassin versant topographique.

Les eaux météoriques (=pluie totale) sont en partie reprises par les phénomènes d'évapotranspiration des plantes. La part non utilisée (= pluie efficace) ruisselle directement vers le réseau hydrographique ou s'infiltre dans le sol. La répartition entre ces deux phénomènes est complexe et reste dépendante de la densité du couvert végétal, de l'intensité des précipitations, de la perméabilité des sols et de leur état de saturation (variation saisonnière), de la topographie, d'éventuelles activités anthropiques,

Sur les sols présentant un couvert végétal « naturel » (prairies, broussailles, bois), l'infiltration constitue le phénomène prépondérant pour l'essentiel des précipitations.

Cependant, l'eau qui s'infiltre dans le sol ne migre pas en profondeur puisque le substratum est imperméable. Les écoulements se font alors préférentiellement au contact de l'arène et du rocher sain imperméable en suivant la topographie naturelle jusqu'à rejoindre les fonds de vallon et alimenter le réseau hydrographique qui draine ainsi l'ensemble de la lame d'eau associée à la pluie efficace (ruissellement et infiltration).

4.4 Occupation du sol

L'analyse de l'occupation du sol a été réalisée à l'aide de l'OSCOM (Observatoire des Surfaces à l'échelle Communale) Auvergne-Rhône-Alpes, en différenciant les bassins versants « plan d'eau » et les bassins versants « témoin ».

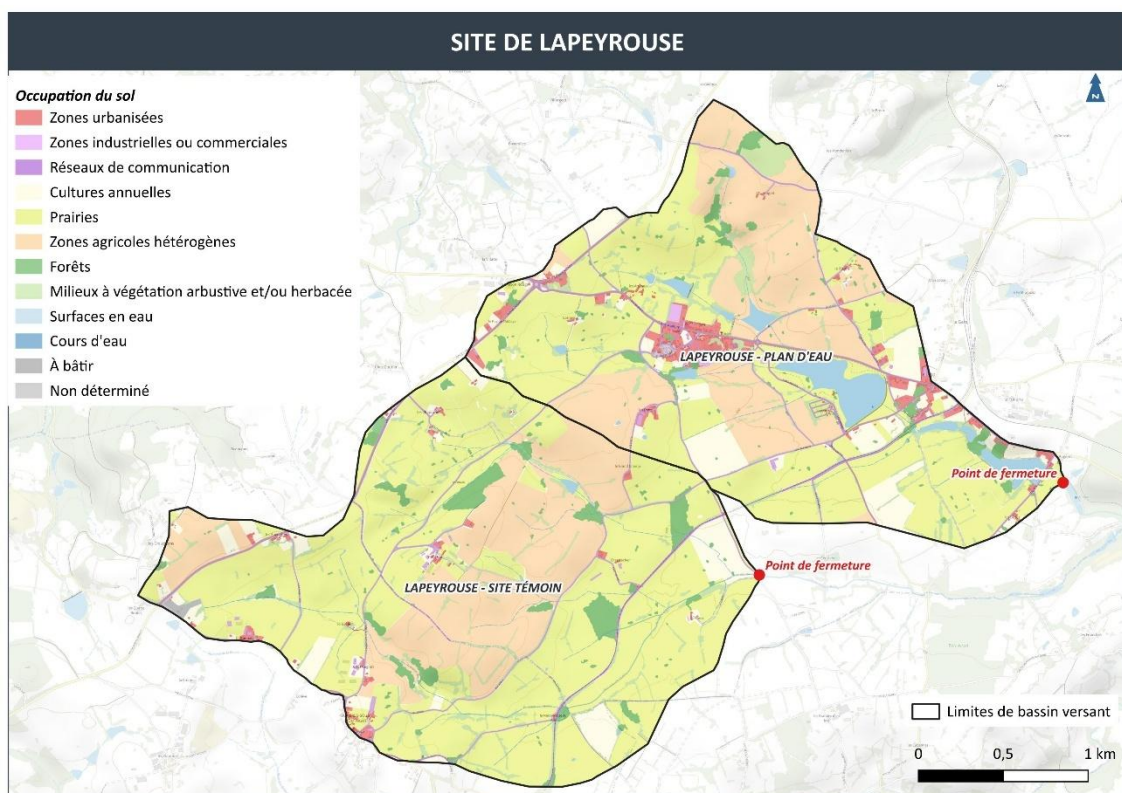
4.4.1 Site de Lapeyrouse

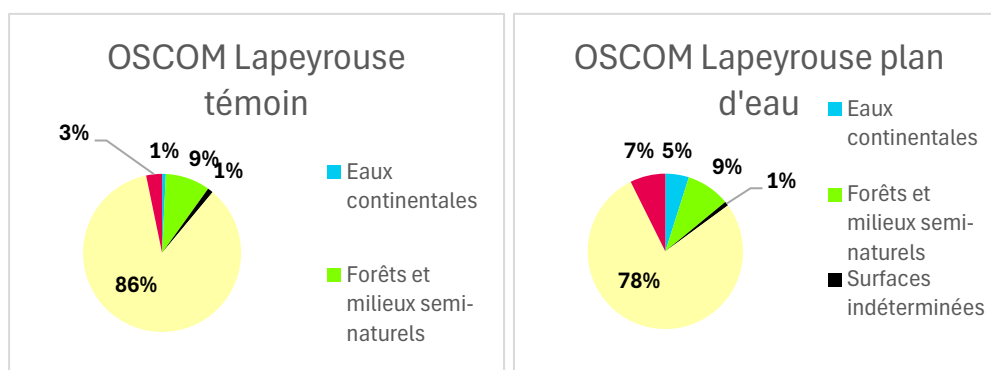
Les deux bassins versants (« plans d'eau » et « témoin ») sont principalement occupés par des espaces agricoles, qui représentent respectivement 78 % et 86 % des surfaces

Le bassin versant « plans d'eau » présente une proportion plus élevée de territoires artificialisés (7 %) par rapport au bassin témoin (3 %) avec notamment le bourg de Lapeyrouse notamment.

Il n'est donc pas exclu que le bassin versant « plan d'eau » présente des débits spécifiques plus élevés que le bassin versant « témoin » pour certaines conditions météorologiques (excédent de ruissellement lié aux surfaces imperméabilisées en période pluvieuse).

Illustration 11 : Occupation du sol sur les bassins versants du site Lapeyrouse



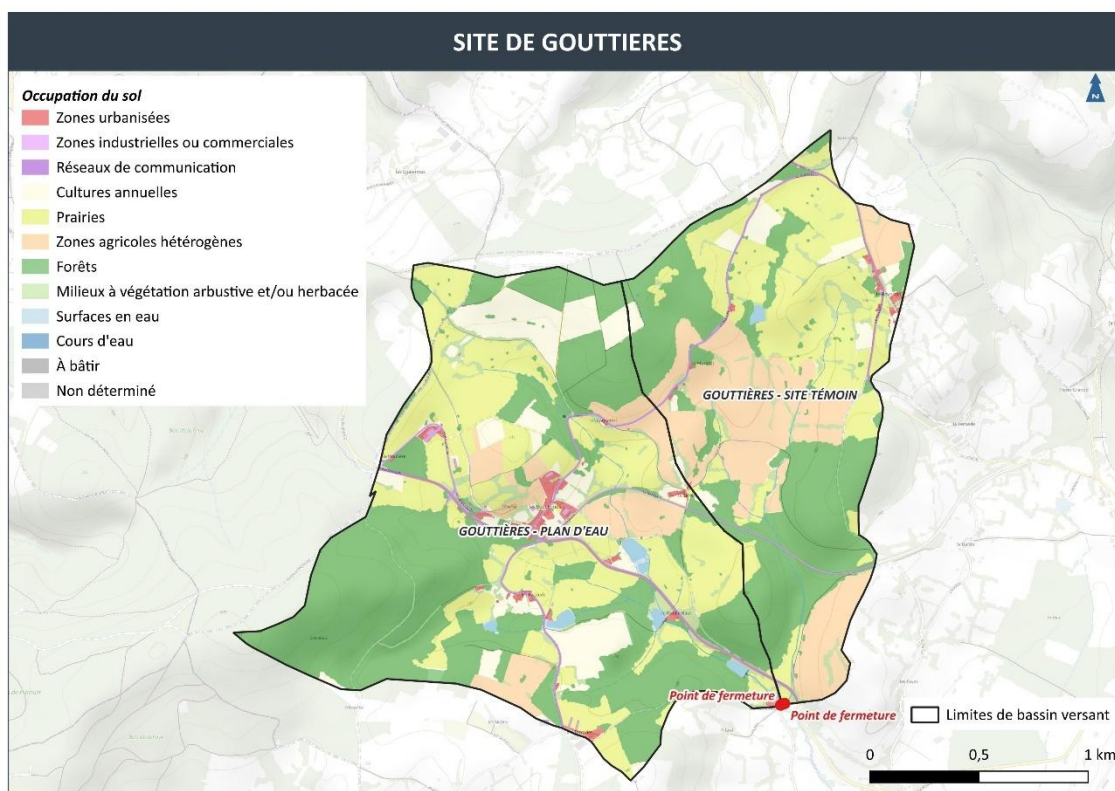


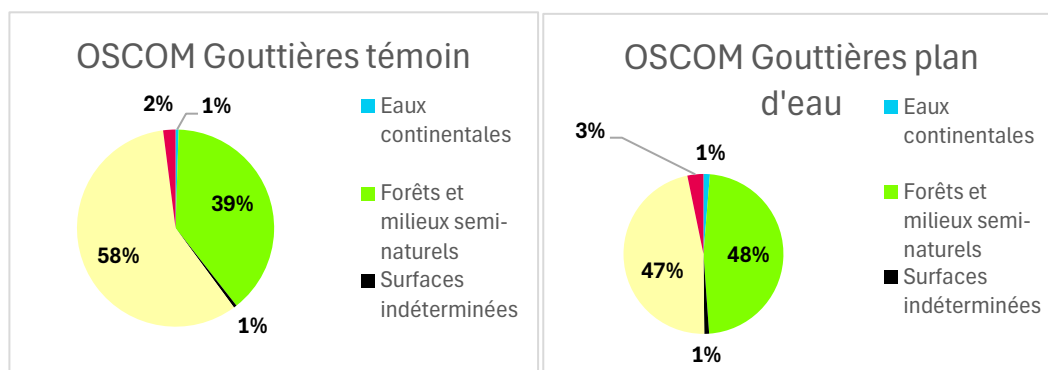
4.4.2 Site de Gouttières

L'occupation du sol est dominée par des territoires agricoles et forestiers sur les deux bassins versants. La proportion de forêts et de milieux semi-naturels est toutefois plus importante sur le bassin versant « plans d'eau » que sur le bassin versant « témoin ».

Ces différences d'occupation du sol peuvent avoir des implications sur la qualité générale des eaux avec potentiellement la présence de composés organiques et minéraux à des concentrations plus importantes en aval des espaces agricoles.

Illustration 12 : Occupation du sol sur les bassins versant du site de Gouttières





4.5 Synthèse

L'occupation du sol sur les quatre bassins versants étudiés est dominée par des espaces agricoles et forestiers.

Les surfaces boisées sont développées sur le site de Gouttières. Le site de Lapeyrouse est quant à lui agricole, avec essentiellement des prairies temporaires et permanentes.

Les bassins versants « témoins » des deux sites présentent des caractéristiques physiques (géologie et occupation du sol), très proches de celles des bassins versants « plans d'eau », ce qui autorise une comparaison pertinente entre ces secteurs vis-à-vis de l'hydologie et de la qualité des cours d'eau présents.

5. Description des suivis mis en œuvre

5.1 Points de suivis et mesures associées

Sur chaque site, les cours d'eau concernés ont été instrumentés en cinq endroits afin de suivre différentes composantes quantitatives et qualitatives (suivi en continu ou suivi ponctuel). Le tableau ci-après et l'illustration suivante précisent la localisation des sites étudiés, le positionnement des points de mesures et les suivis mis en œuvre.

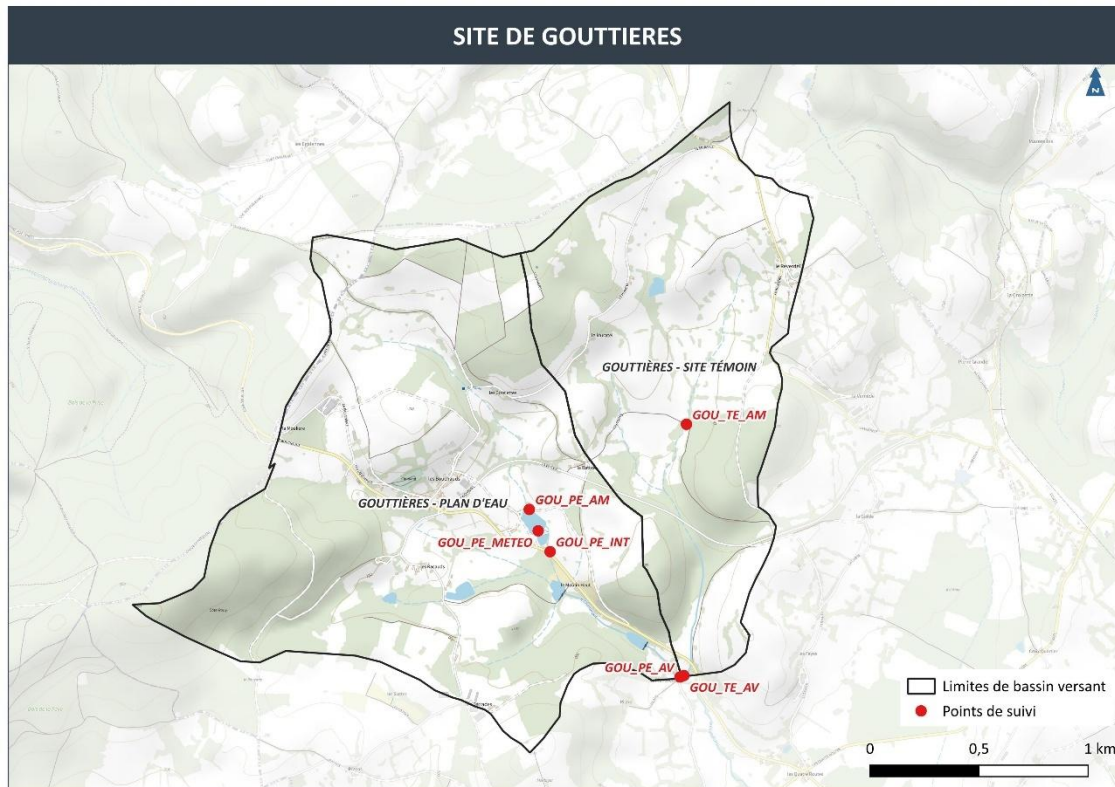
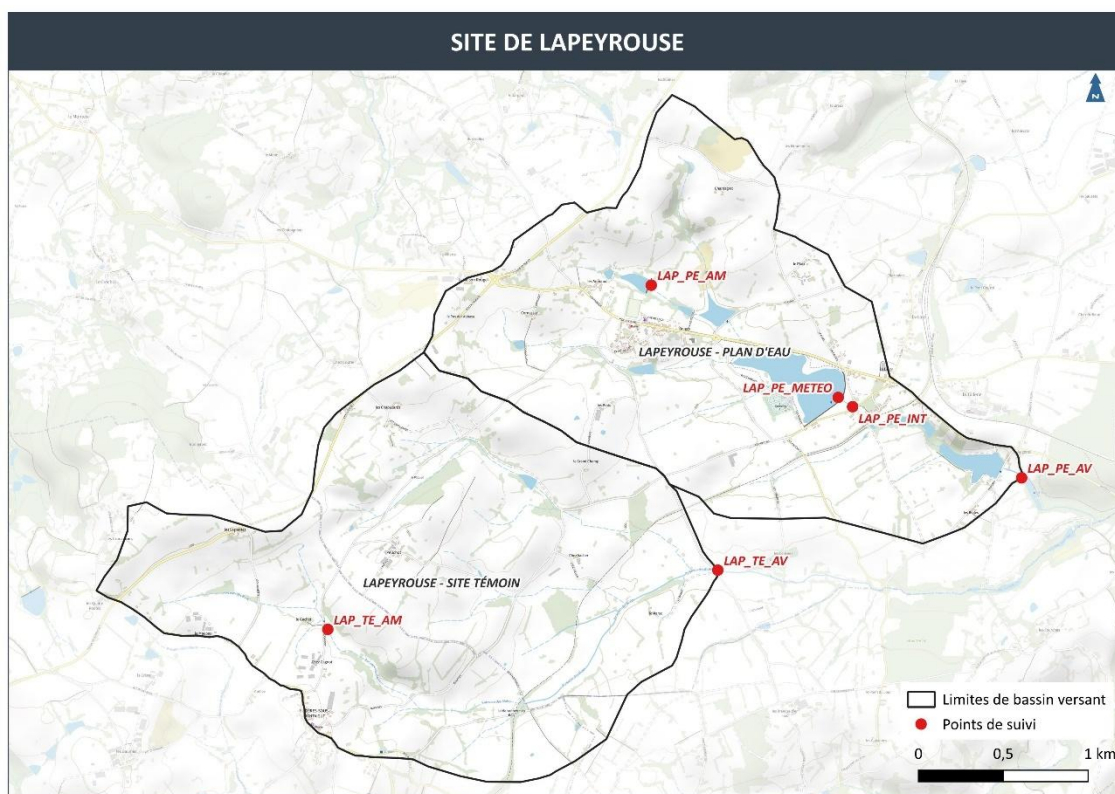
La codification retenue pour l'appellation des différents points de suivi sur les cours d'eau reprend trois informations permettant rapidement de se situer :

- **Information n°1 : Localisation** => « LAP » : Lapeyrouse – « GOUT » : Gouttières
- **Information n°2 : Bassin versant étudié** => « PE » : Bassin versant « Plan d'Eau » – « TE » : Bassin versant « Témoin »
- **Information n°3 : Positionnement géographique** => « AM » : Amont – « INT » : Intermédiaire – « AV » : Aval

Tableau 1 : Points de suivi (terminologie et métrologie)

		Bassin versant « Plan d’eau »	Bassin versant « Témoin »
Cours d’eau	Station amont	Référence	
		LAP_PE_AM GOU_PE_AM	LAP_TE_AM GOU_TE_AM
		Type de suivi	
		Suivi hydrologique en continu Suivi température en continu Suivi « oxygène dissous » en continu Suivi physico-chimique mensuel	
	Station intermédiaire	Référence	
		LAP_PE_INT GOU_PE_INT	Non concerné
		Type de suivi	
		Suivi température en continu Suivi « oxygène dissous » en continu Suivi physico-chimique mensuel	Non concerné
	Station aval	Référence	
		LAP_PE_AV GOU_PE_AV	LAP_TE_AV GOU_TE_AV
		Type de suivi	
		Suivi hydrologique en continu Suivi température en continu Suivi « oxygène dissous » continu Suivi physico-chimique mensuel	
Plan d’eau		Référence	
		LAP_PE_METEO GOU_PE_METEO	
		Type de suivi	
		Suivi météorologique en continu Suivi évaporation en continu	Non concerné

Illustration 13 : Localisation des sites et des points de suivis






5.2 Suivi hydrologique en continu

Moyens mis en œuvre :

- Installation d'un seuil « *déversoir triangulaire 90°* » au travers du cours d'eau (à l'exception de GOUT_PE_AV où il existe déjà une section calibrée (ouvrage cadre rectangulaire) ;
- Pose d'une sonde immergée avec capteur de pression et température couplée à une sonde barométrique, toutes deux avec enregistrement horaire (marque Solins – Levellogger M5 et Baro logger) ; Mesures de la pression exercée par la colonne d'eau transformées en lame d'eau déversée.
- Campagnes de mesure de débit par méthode capacitive ou au courantomètre permettant d'établir une relation « hauteur d'eau – débit » et valider les formules d'hydraulique pour les déversoirs triangulaires (formule de Bazin).

Illustration 14 : Les équipements pour le suivi hydrologique

	Bassin versant « Plan d'eau »	Bassin versant « Témoin »
Amont		
Aval		

	Bassin versant « Plan d'eau »	Bassin versant « Témoin »
<i>Amont</i>	 <p>GOUT_PE_AM_- Nov. 2023</p>	 <p>GOUT_TE_AM_- Fév... 2024</p>
<i>Aval</i>	 <p>GOUT_PE_AV_- Juin. 2024</p>	 <p>GOUT_TE_AV_- Nov. 2023</p>

Le suivi des hauteurs d'eau a été réalisé à l'aide de sondes barométrique et de niveau d'eau de la marque Solins. La sonde de niveau d'eau conçue pour être immergée continuellement, effectue des mesures de pression et de température de l'eau toutes les heures. Parallèlement, la sonde barométrique mesure la pression atmosphérique et la température. Cette dernière permet de corriger les mesures de la sonde de niveau d'eau en prenant en compte les variations atmosphériques. Ainsi, la pression exercée par l'eau sur le capteur immergé est convertie en hauteur d'eau à l'aide d'un logiciel spécifique fourni par le constructeur. Ce logiciel permet de réaliser cette compensation automatiquement et d'extraire les données de hauteurs d'eau pour les analyser ultérieurement.



Illustration 15 : Sonde de niveau d'eau (ensemble level – baro)

Les jaugeages pour établir une courbe de tarage ou valider les formules hydrauliques adaptées aux déversoirs triangulaires sont réalisés à l'aide d'un courantomètre OTT MF PRO.

Pour les faibles débits (gamme 0-3 l/s) la mesure peut également se faire par méthode capacitive depuis le seuil.



Illustration 16 : Courantomètre OTT MF PRO

5.3 Suivi en continu (oxygénation et température des eaux - météorologie - évaporation)

5.3.1 Suivi oxygène dissous - Température

Moyens mis en œuvre :

- Sonde O₂/T immergée reliée par câble à un enregistreur.
- Marque Janus.
- Fréquence d'enregistrement : une mesure toutes les 4 heures.

5.3.2 Suivi météorologique

Moyens mis en œuvre :

- Station météorologique autonome de mesures et d'acquisition (données horaires).
- Marque : SENCROP.
- Paramètres suivis :
 - Irradiance (MJ/m²),
 - Direction du vent (°),
 - Rafale de vent (km/h),
 - Vitesse du vent (km/h),
 - Pluie (mm),



- Humidité relative (%) – (moye – min – max),
- Température (°C) – (moye – min – max).

5.3.3 Suivi Evaporation

Moyens mis en œuvre :

- Bac d'évaporation avec enregistrement horaire du niveau d'eau (sonde Solins barologger).
- Passages réguliers pour contrôler le matériel et si besoin renouveler le volume d'eau dans les bacs.



5.4 Suivi physico-chimique ponctuel – Analyses laboratoire

Moyens mis en œuvre :

- Prélèvements mensuels sur chaque point instrumenté entre février et octobre 2024
- Analyses en laboratoire (CARSO LSEHL) des paramètres suivants : turbidité, matières en suspension, phosphore total, orthophosphates, azote Kjeldahl (NTK), azote global, ammonium, nitrates, nitrites.

5.5 Période de suivi

L'instrumentation des sites était initialement prévue au printemps 2023. Leur recherche et l'obtention des autorisations nécessaires à l'installation du matériel n'ont pas permis de respecter ce planning.

Le matériel a été installé à la fin du mois d'août 2023 et les enregistrements ont été opérationnels à partir du 1^{er} septembre 2023.

Le début du suivi est donc intervenu à la fin d'un été particulièrement sec. Il a été mené pendant toute la fin d'année 2023 et sur l'année 2024 en intégrant toute la période estivale.

Les fortes précipitations de l'automne 2024 ont conditionné la fin du suivi et l'enlèvement du matériel qui est intervenu le 12 novembre 2024.

Le suivi aura donc été effectif pendant une durée 14,5 mois s'étalant entre septembre 2023 et novembre 2024.

6. Résultats des suivis et principaux enseignements

6.1 Conditions hydroclimatiques pendant la période de suivi

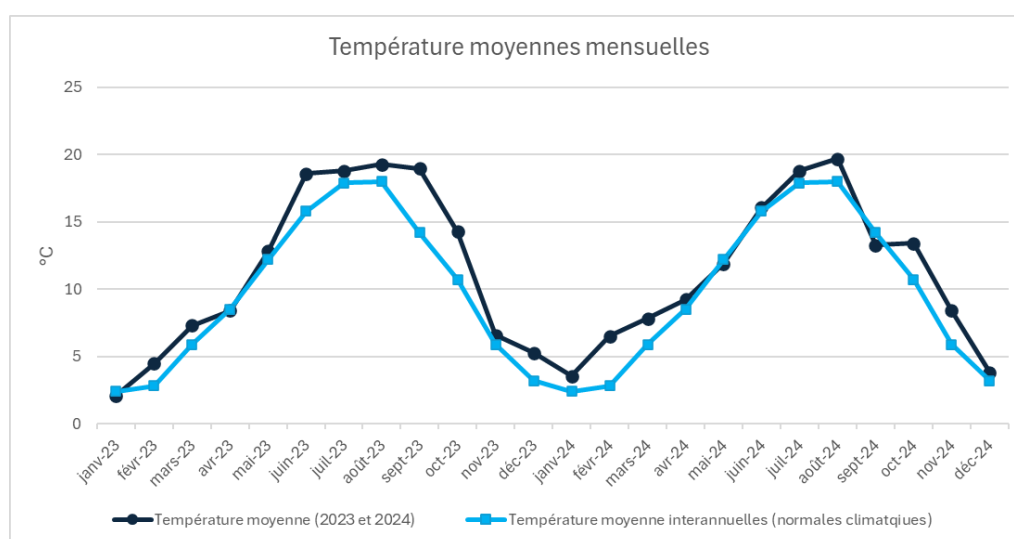
6.1.1 Conditions climatiques

Pour contextualiser les conditions climatiques durant la période de suivi, les données météorologiques de la station de Saint-Gervais-d'Auvergne ont été analysées et comparées aux normales climatiques de la période 1991-2020 (fiche climatologique – MétéoFrance).

Les températures moyennes mensuelles des années 2023 et 2024 se situent, pour presque tous les mois, au-dessus des moyennes saisonnières. Cependant, **l'été 2023 se distingue par des valeurs particulièrement élevées par rapport aux moyennes annuelles**, traduisant un épisode notable de chaleur.

En 2024, les mois de juillet et août sont également supérieurs aux moyennes saisonnières, bien que de manière moins marquée qu'en 2023. À l'inverse, juin et septembre présentent des températures égales ou inférieures aux normales saisonnières.

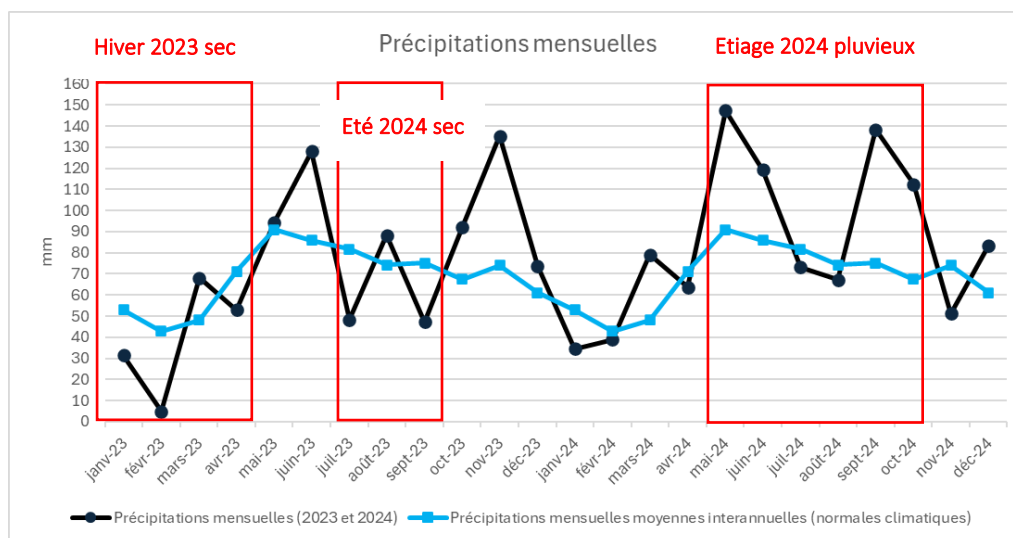
Illustration 17 : Températures moyennes mensuelles observées en 2023 et 2024 par rapport aux moyennes saisonnières à la station météorologique de Saint-Gervais-d'Auvergne



Pour ce qui concerne les précipitations, l'année 2023 a été marquée par des cumuls généralement inférieurs ou proches des moyennes saisonnières, à l'exception des mois de mars et de juin, où les précipitations ont été nettement supérieures aux normales. La fin de l'année 2023 se distingue également par des cumuls particulièrement élevés, contrastant avec un début d'année extrêmement sec, notamment en février, où les précipitations étaient exceptionnellement faibles par rapport aux moyennes.

Pour 2024, la majorité des mois présentent des cumuls proches des moyennes saisonnières, à l'exception de janvier et novembre, où les précipitations ont été nettement inférieures. En revanche, les mois de mai, juin, septembre, et octobre se démarquent par des cumuls très élevés, dépassant de 40 à 80 % les moyennes saisonnières. Ce surplus traduit un contexte estival particulièrement humide pour cette année.

Illustration 18 : Précipitations mensuelles observées en 2023 et 2024 par rapport aux moyennes saisonnières à la station météorologique de Saint-Gervais-d'Auvergne



Les conditions climatiques rencontrées pendant la période de suivi lors de l'été 2024 sont potentiellement favorables aux phénomènes d'évaporation sur les plans d'eau dans la mesure où les températures moyennes estivales sont plus importantes que celles habituellement constatées. Toutefois ce phénomène reste potentiellement masqué par le fort excédent pluviométrique constaté entre mai et octobre 2024.

6.1.2 Conditions hydrologiques

La station hydrométrique de la Bouble à Chareil-Cintrat a été utilisée pour comparer les débits observés durant la période de suivi aux moyennes interannuelles de cette station, qui dispose d'une chronique conséquente de 51 ans (cf. Illustration 19).

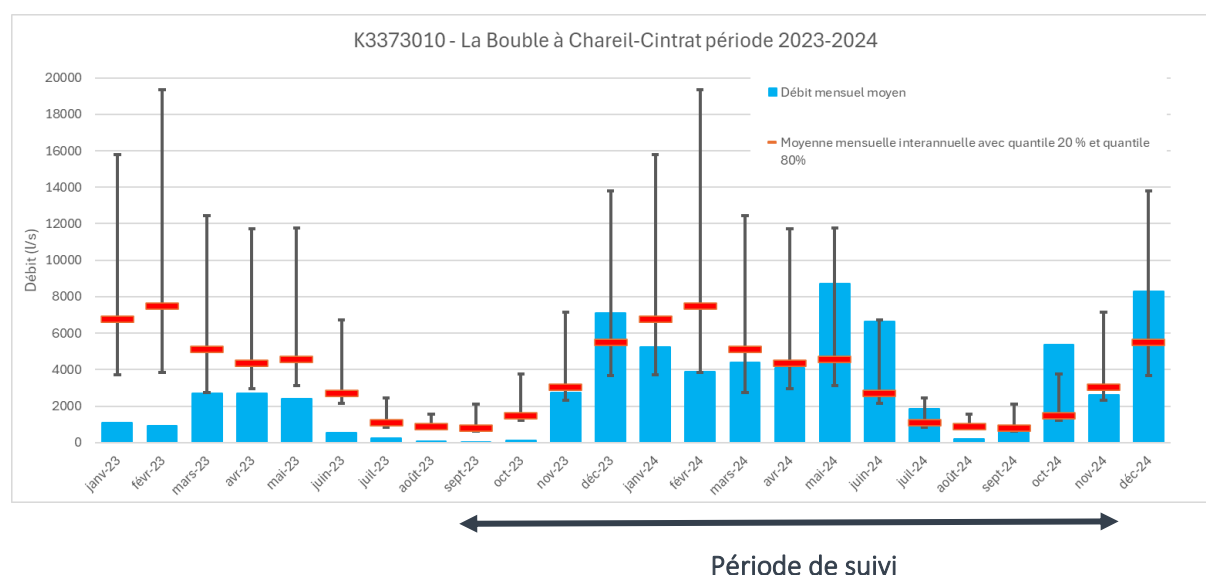
En 2023, le bassin versant a été fortement affecté par une sécheresse persistante, avec des débits mensuels fréquemment inférieurs au QM5 (quantile des 20 %). Cette situation a perduré presque toute l'année, témoignant de l'ampleur de l'épisode. Les premiers mois de l'année, comme janvier et février, étaient marqués par des débits nettement inférieurs aux normales, et cette tendance s'est prolongée tout au long de l'été, reflétant la gravité de la sécheresse. Les débits n'ont commencé à remonter que vers novembre 2023.

En revanche, l'année 2024 contraste fortement avec 2023. Certains mois, comme juin et octobre, se démarquent par des débits atteignant ou dépassant le quantile des 80 %, traduisant des conditions hydrologiques exceptionnelles. Toutefois, certaines périodes restent marquées par des débits inférieurs aux normales, notamment en janvier et août 2024, illustrant une variabilité persistante malgré l'amélioration globale.

Le suivi, réalisé entre septembre 2023 et novembre 2024, s'est déroulé sur une période globalement plus humide par rapport aux conditions observées au début de l'année 2023 et durant l'été 2023, marqués par une sécheresse importante.

Cette humidité relative a été particulièrement notable lors de l'été 2024, où des précipitations largement supérieures aux moyennes ont été enregistrées, contrastant avec la sécheresse de l'été précédent.

Illustration 19 : débits moyens mensuels sur la période 2023-2024 en comparaison aux statistiques mensuelles interannuelles sur la station de la Bouble à Chareil-Cintrat



6.2 « Météorologie » - Données collectées et interprétation

Les données présentées sont issues des enregistrements des deux stations météorologiques installées au niveau des deux sites d'étude, données transmises quotidiennement et consultables sur le site du fabricant (<https://sencrop.com/fr/>). Toutes ces données sont disponibles aux pas de temps horaire et journalier.

6.2.1 Site de Lapeyrouse

• Précipitations

Les **cumuls de pluie journaliers** dépassent rarement les 20 mm (cf. Illustration 20). Cependant, en 2024, à partir de mai, cette valeur a été franchie plus fréquemment. Malgré cela, les précipitations journalières se situent la plupart du temps entre 0 et 5 mm sur cette période. On notera que la fréquence de retour des pluies sur ce site est importante puisqu'elle atteint 52% (avec 224 jours pluvieux enregistrés pendant la période de suivi). Les périodes sans précipitations sont peu fréquentes.

Seuls octobre 2023 et pour partie août 2024 présente un enchainement de plusieurs journées sans précipitation.

Les **cumuls mensuels** (cf. Illustration 21) montrent une augmentation notable à partir de mai 2024, marquant une seconde partie de la chronique plus humide. À l'inverse, l'année 2023 semble globalement plus sèche que 2024, comme en témoignent les mois de septembre et octobre, seuls mois communs entre les deux années, où les cumuls sont significativement inférieurs. Cependant, le mois d'août 2024 enregistre les précipitations les plus faibles de toute la chronique, illustrant une variabilité importante même au sein des périodes plus humides.

Illustration 20 : Pluie journalière – site de Lapeyrouse

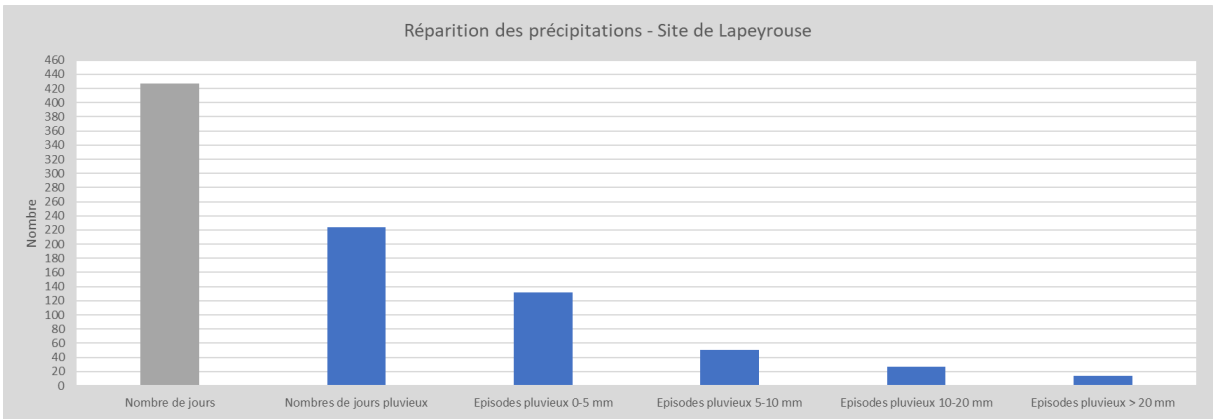
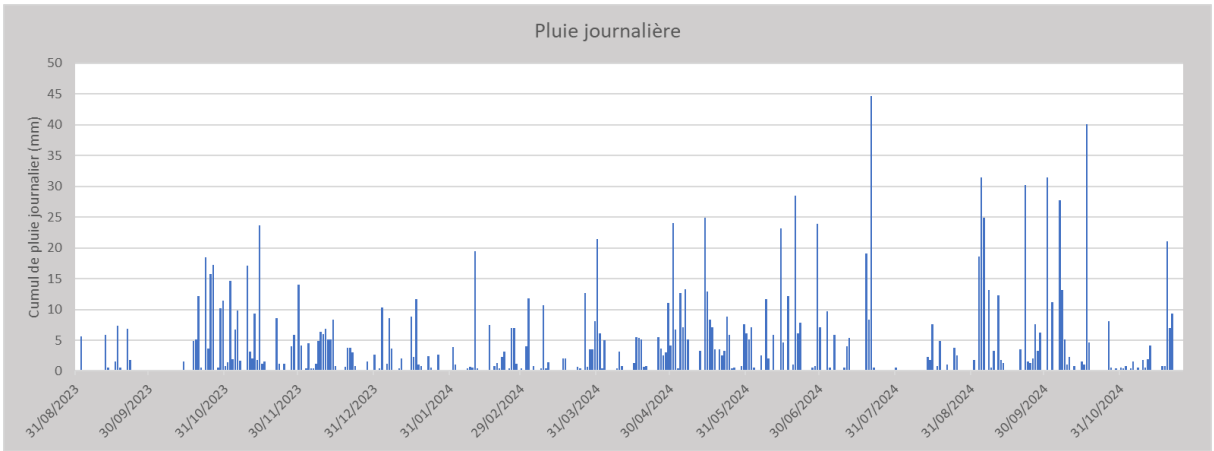
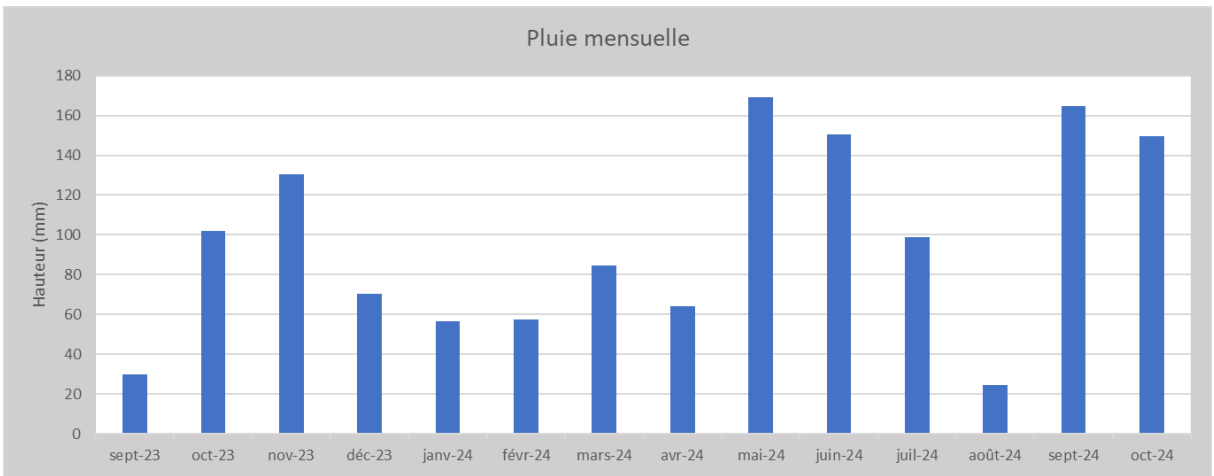


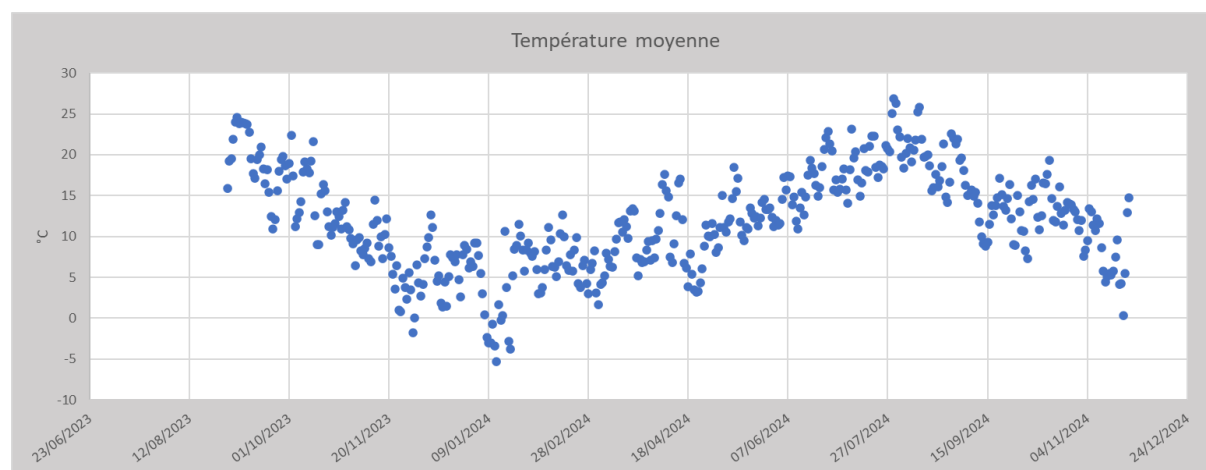
Illustration 21 : Pluie mensuelle – site de Lapeyrouse



• Températures

Les **températures** relevées sur la période d'étude ont fluctué entre -5 °C et 26 °C, mettant en évidence une nette tendance saisonnière. En hiver, les températures peuvent descendre en dessous de zéro, tandis qu'en été, elles oscillent principalement entre 15 et 25 °C. Une diminution marquée des températures est observée entre début septembre 2023 et début janvier 2024, traduisant l'entrée dans la saison hivernale. En revanche, la remontée des températures de janvier à fin juillet est plus graduelle, correspondant à la transition vers les mois estivaux. Cette dynamique saisonnière se poursuit avec une nouvelle baisse des températures à partir de la fin de l'été jusqu'à la conclusion de la chronique. On notera également un épisode de fort rafraîchissement à la mi-septembre 2024.

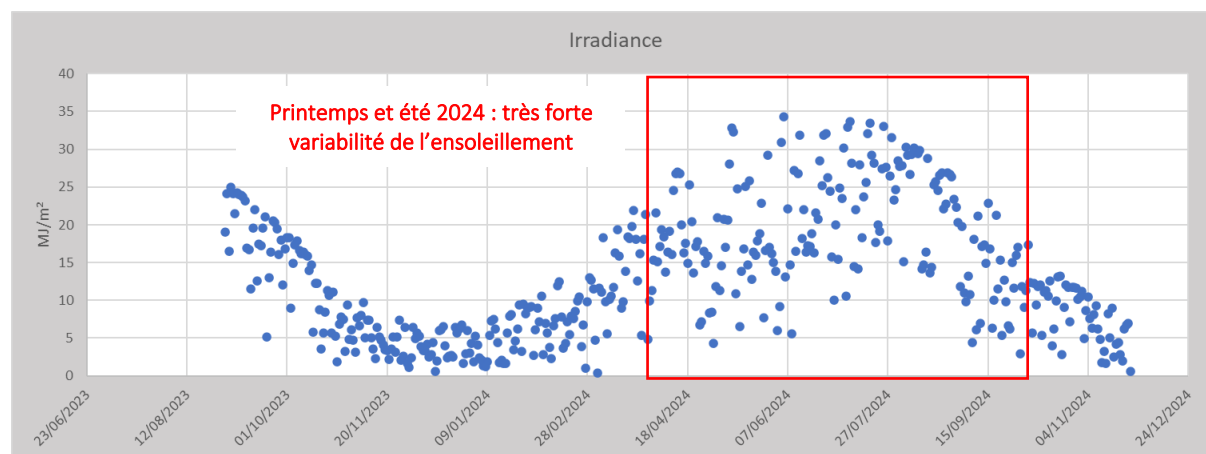
Illustration 22 : Température moyenne journalière - site de Lapeyrouse



• Ensoleillement

L'**irradiance** est influencée par des facteurs saisonniers et météorologiques tels que l'inclinaison de la Terre par rapport au soleil et la couverture nuageuse. La distinction entre les saisons est bien marquée, avec des valeurs nettement inférieures en hiver, souvent en dessous de 10 MJ/m², et des pics estivaux pouvant atteindre 35 MJ/m². Cependant, durant l'été 2024, les valeurs sont particulièrement variables, avec une dispersion significative et des périodes où l'irradiance reste relativement basse, autour de 10 MJ/m², probablement en lien avec le couvert nuageux lié aux nombreuses précipitations ou des conditions atmosphériques locales.

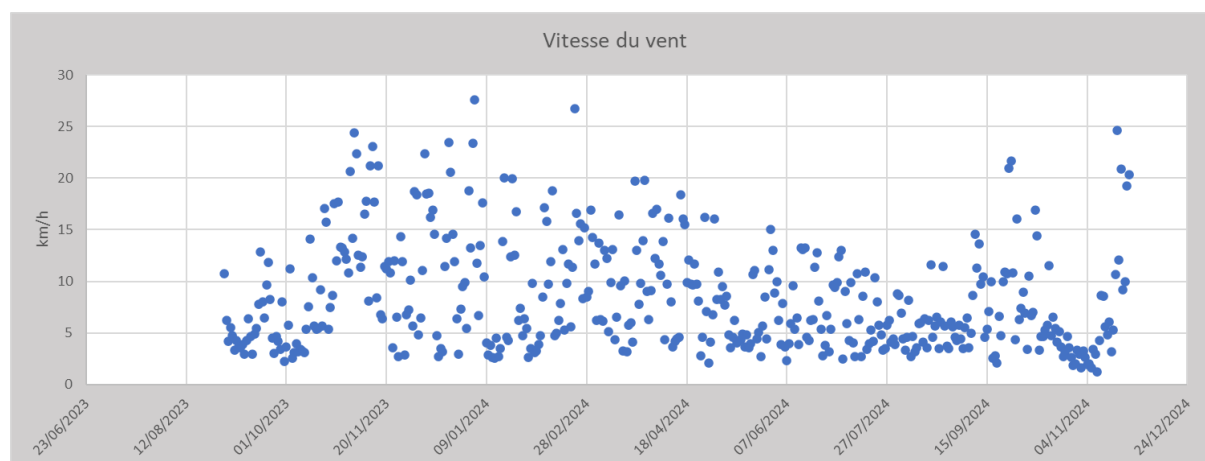
Illustration 23 Irradiance - site de Lapeyrouse



• Vent

La vitesse moyenne du vent observée est majoritairement inférieure à 10 km/h. Contrairement à d'autres paramètres météorologiques, aucun cycle saisonnier ou périodique clair ne semble se dégager de cette donnée. On notera toutefois que la période estivale de 2024 correspond à une période peu ventée par rapport à ce qui est constaté le reste du temps.

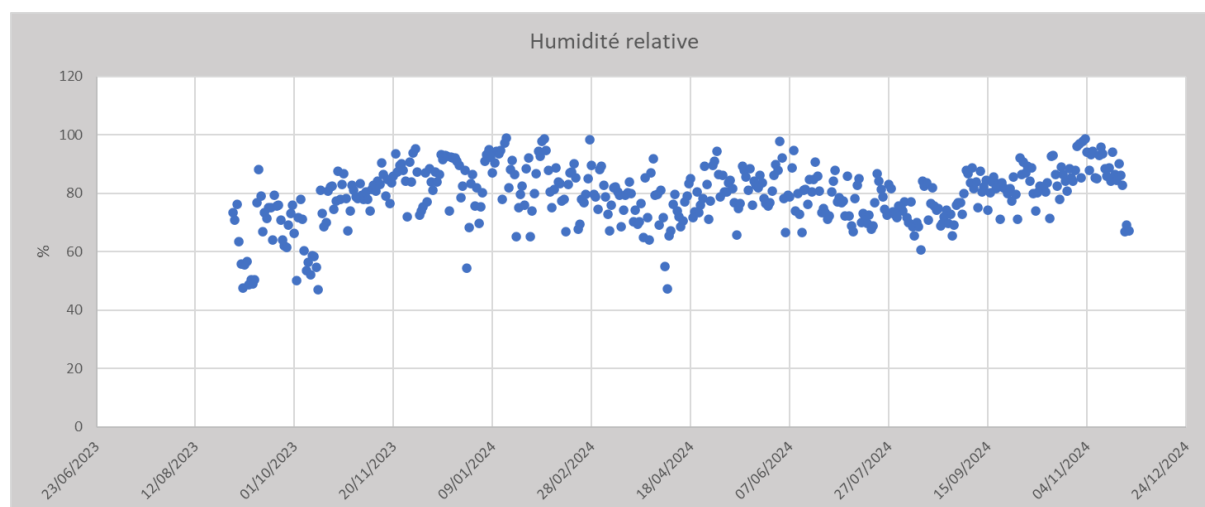
Illustration 24 : Vitesse du vent - site de Lapeyrouse



• Humidité

L'humidité relative oscille majoritairement autour de 80 % tout au long de la chronique, avec des hausses ou baisses ponctuelles. Toutefois, aucune tendance ou cycle saisonnier marqué ne se dégage, ce qui suggère que les variations de l'humidité relative sont davantage influencées par des conditions météorologiques spécifiques ou des événements locaux.

Illustration 25 : Humidité relative - site de Lapeyrouse



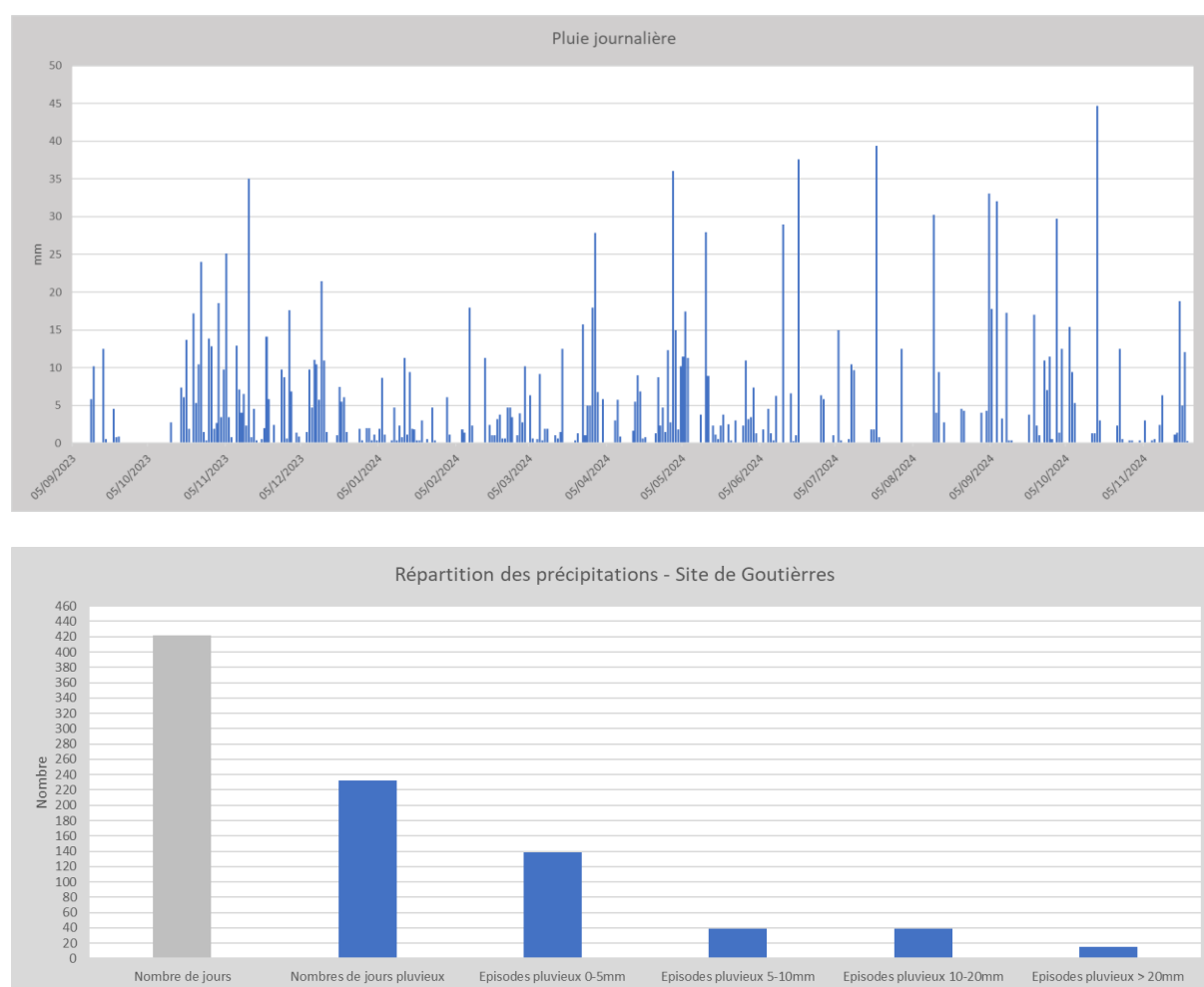
6.2.2 Site de Gouttières

Le contexte climatique sur le site de Gouttières reste très proche de celui constaté à Lapeyrouse compte tenu de la proximité géographique des deux sites.

• Précipitations

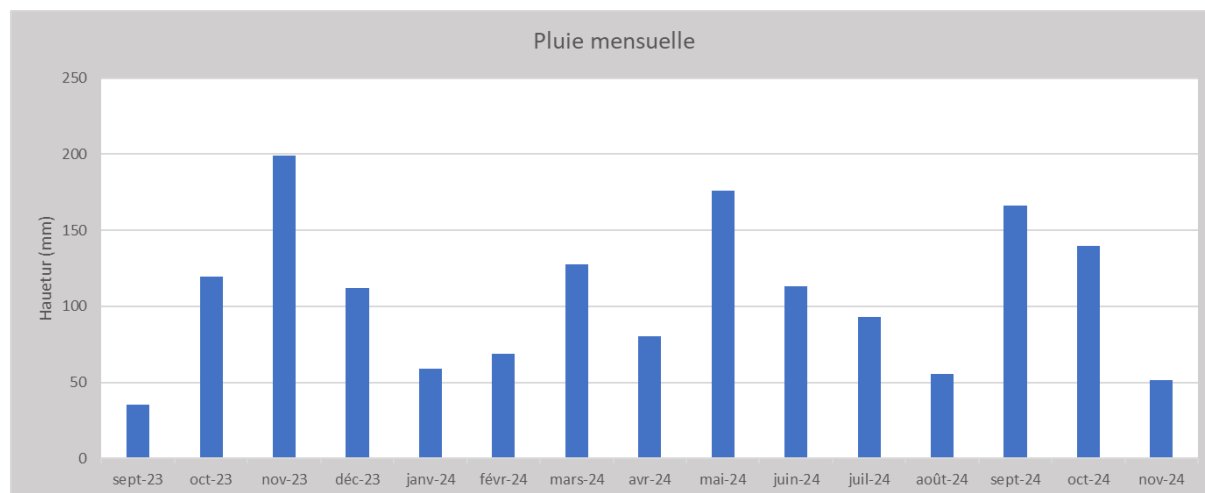
Les **cumuls de pluies journaliers** dépassent rarement les 15 mm par jour. A partir de mai 2024 cette valeur est franchie plus fréquemment, comme observé sur le site de Lapeyrouse. Cela indique une augmentation de la fréquence des épisodes pluvieux durant cette période, suggérant des conditions météorologiques plus instables ou des événements pluvieux plus marqués. Comme sur l'autre site, la fréquence de retour des pluies est importante puisqu'elle atteint 55% (avec 232 jours pluvieux enregistrés pendant la période de suivi). Les périodes sans précipitations sont peu fréquentes. Seuls octobre 2023 et pour partie août 2024 (avec un important orage enregistré contrairement à Lapeyrouse) présentent un enchainement de plusieurs journées sans précipitation.

Illustration 26 : Pluie journalière - site de Gouttières



Les **cumuls mensuels** dépassent très régulièrement les 100 mm, notamment au cours de l'été 2024 (entre mai et octobre inclus).

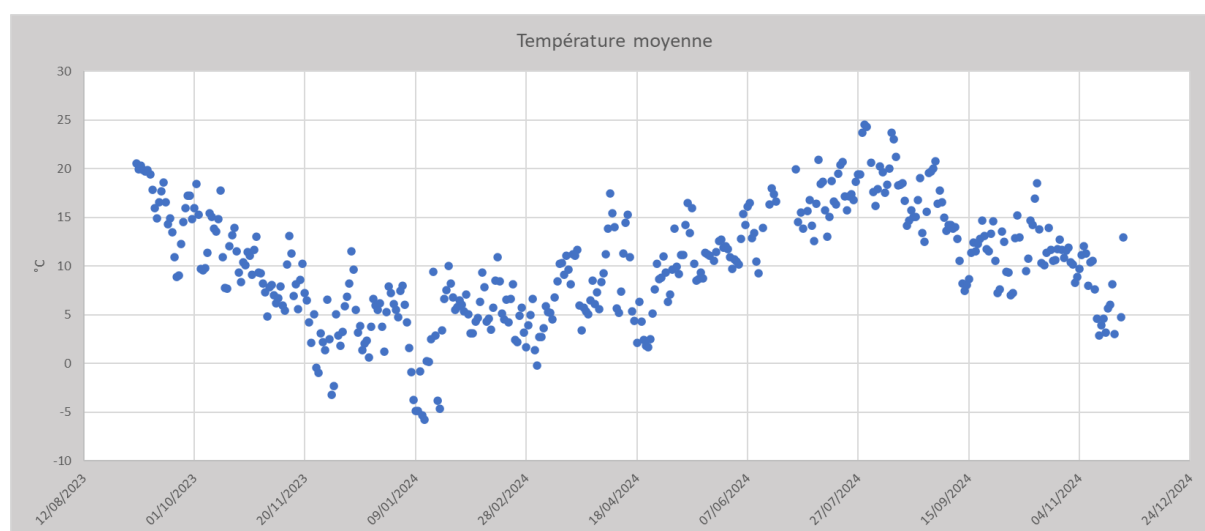
Illustration 27 : Pluie mensuelle - site de Gouttières



• Température

Les températures relevées sur la période d'étude ont fluctué entre -6 °C et 25 °C, mettant en évidence une nette tendance saisonnière. Ces évolutions sont similaires à celles de Lapeyrouse et ne permettent pas de faire de réelle distinction entre les deux sites.

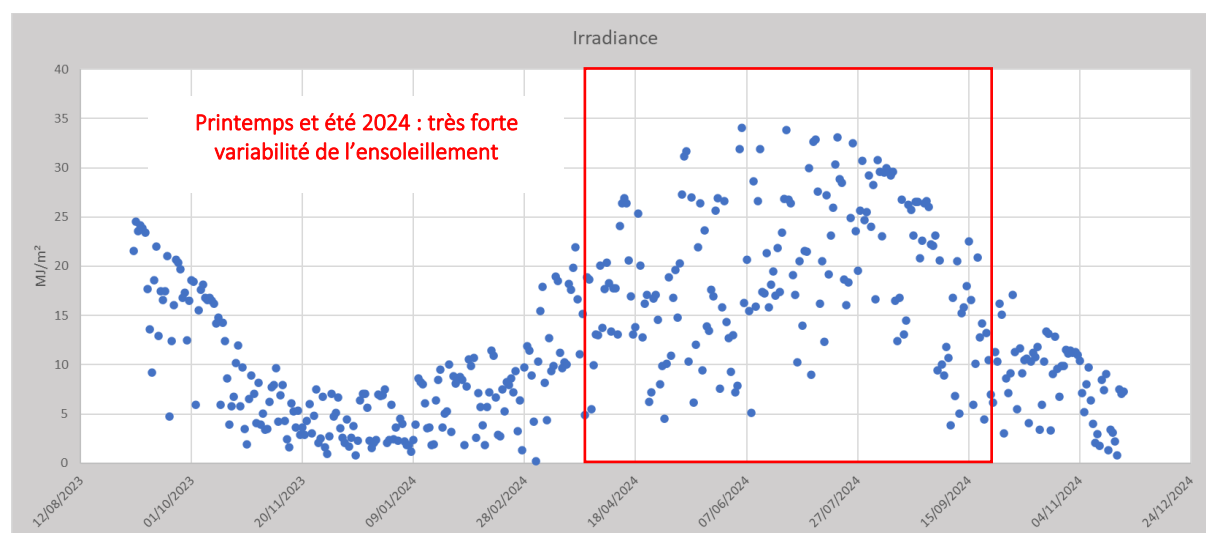
Illustration 28 : Température moyenne journalière - site de Gouttières



• Ensoleillement

La distinction entre les saisons est bien marquée, avec des valeurs nettement inférieures en hiver, souvent en dessous de 10 MJ/m², et des pics estivaux pouvant atteindre 35 MJ/m². Cependant, durant l'été, les valeurs sont particulièrement variables, avec une dispersion significative et des périodes où l'irradiance reste relativement basse, autour de 5 MJ/m², probablement en lien avec le couvert nuageux lié aux précipitations estivales ou des conditions atmosphériques locales.

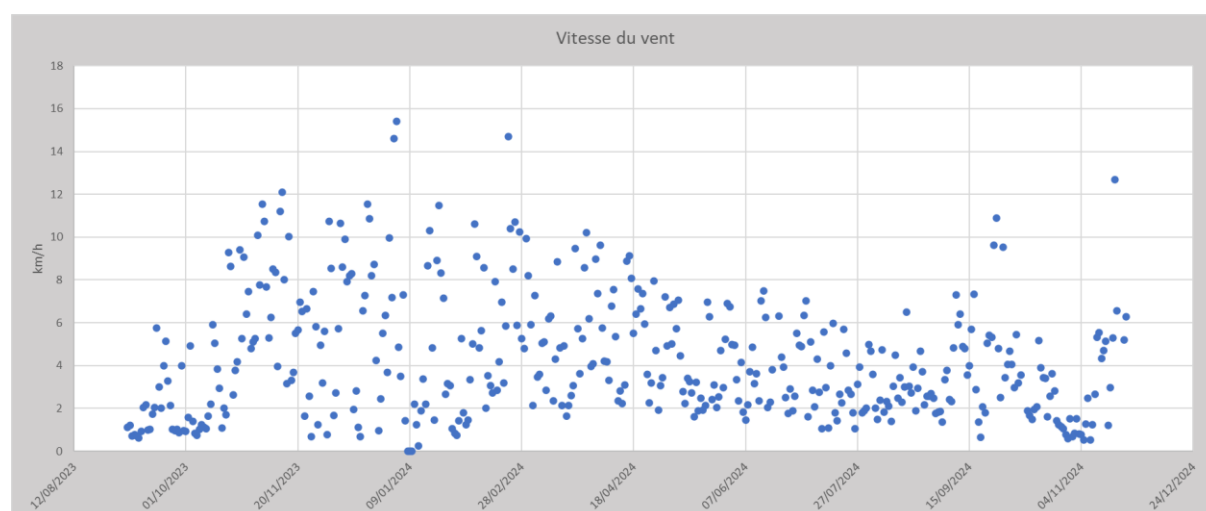
Illustration 29 : Irradiance - site de Gouttières



• Vent

La vitesse du vent est majoritairement inférieure à 6 km/h. Contrairement à d'autres paramètres météorologiques, aucun cycle saisonnier ou périodique clair ne semble se dégager de cette donnée. La période estivale apparaît cependant être celle où les phénomènes venteux sont moindres. On remarquera que le vent sur le site de Gouttières présente des vitesses plus faibles que sur le site de Lapeyrouse (voir Illustration 24).

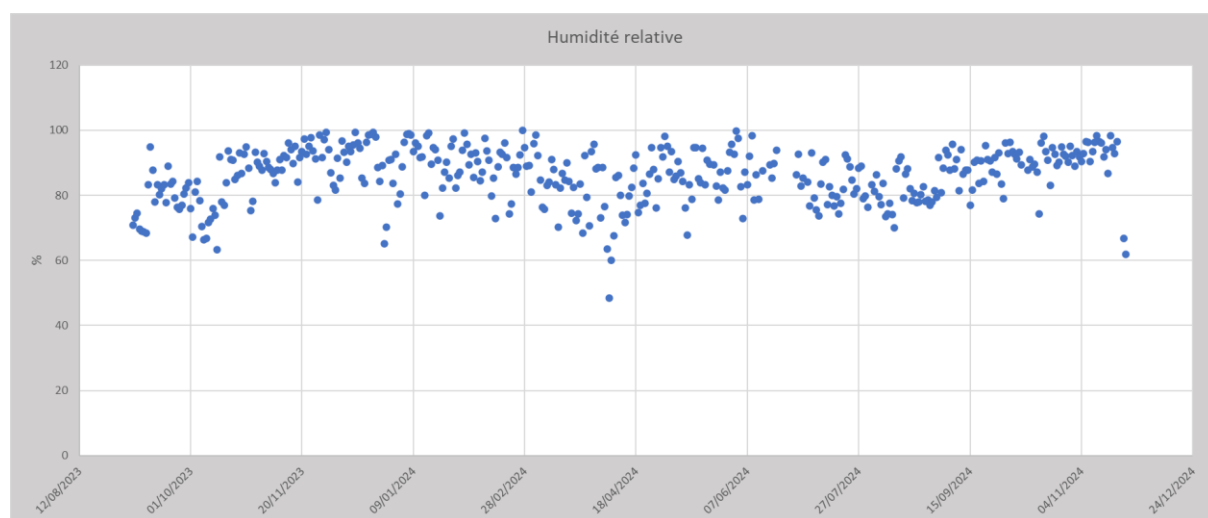
Illustration 30 : Vitesse du vent journalière - site de Gouttières



• Humidité

L'humidité relative oscille majoritairement autour de 90 % tout au long de la chronique, avec des hausses ou baisses ponctuelles. Toutefois, aucune tendance ou cycle saisonnier marqué ne se dégage.

Illustration 31 : Humidité relative - site de Gouttières



6.3 « Evaporation » - Données collectées et interprétation

6.3.1 Méthode d'évaluation

Les phénomènes d'évaporation sur un plan d'eau sont complexes et dépendent de nombreux paramètres :

- Le rayonnement solaire net,
- La température de la surface évaporant et celle de l'air,
- La vitesse du vent,
- La différence entre la tension de vapeur entre la surface évaporant et l'air,
- La pression atmosphérique,
- La nature de la surface en eau (plane, clapot, courant), ...

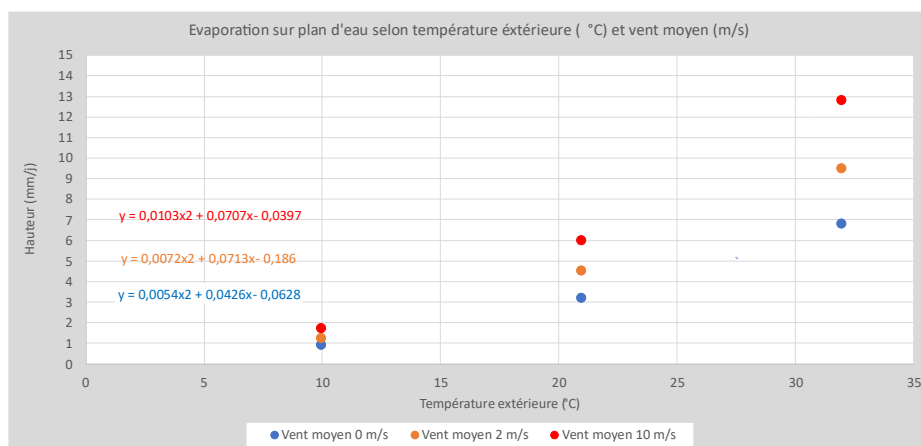
De nombreuses méthodes de calcul ont été développées pour évaluer ce phénomène au pas de temps journalier, mensuel, ... Ces méthodes utilisent des données climatiques plus ou moins complexes et disponibles.

Dans le cadre de cette étude, nous avons essayé d'évaluer le volume d'eau s'évaporant sur la surface des plans d'eau en utilisant les données météorologiques mesurées sur chaque site et celles issues du suivi sur un bac d'évaporation.

• 1 - Méthode empirique

Il s'agit de valeurs moyennes issues d'observations et mesurées en fonction de la température extérieure et de la vitesse du vent sur différents plans situés aux états unis. Une hauteur moyenne est indiquée pour trois gammes de vents et de températures extérieures. Les valeurs pour des conditions intermédiaires sont obtenues par extrapolation.

Illustration 32 : Evaluation de l'évaporation sur un plan d'eau par méthode empirique (Source : Dorsey, Properties of water substance, Reinhold NY)



• 2 - Méthode Aldomany

Mohammad Aldomany a développé, dans le cadre de sa thèse¹, une formule de calcul applicable sur le territoire français s'appuyant sur des données météorologiques.

La formule proposée pour les plans d'eau du centre ouest de la France (Brenne et Limousin) est la suivante :

$$E = 0,1.Rs + 0,178.T^{\circ}eau - 0,049.T^{\circ}air - 0,019.Hr + 0,324.V + 0,31$$

Avec :

- E : Evaporación en mm/j,
- Sr : Rayonnement solaire en MJ/m²/j,
- Taira : température moyenne journalière de l'air (°C),
- Tea : température moyenne journalière de l'eau (°C),
- Rh : Humidité relative moyenne de l'air (%),
- V : Vitesse moyenne du vent (m/s).

• 3 - Méthode Penman-Monteith

Cette méthode de calcul de l'évaporation et/ou de l'évapotranspiration potentielle des plantes est couramment utilisée. C'est cette formule qui est habituellement retenue par les services de Météo France. La formule utilisée est la suivante :

$$ETP = \frac{0.408\Delta Rg_{net} + \gamma \frac{900}{T_{moy} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Avec :

- ETP : évaporation potentielle en mm/jour
- Δ : pente de la courbe de saturation de la vapeur d'eau en kPa/°C
- Rg : rayonnement net en MJ/m²/jour
- Rgnet : (1 - α).Rg avec α albedo
- Tmoy : température moyenne de l'air en °C
- u₂ : vitesse du vent à 2 mètres au-dessus du sol en m/s
- e_s : pression de vapeur saturante en kPa
- e_a : pression de vapeur partielle de l'air en kPa
- γ : constante psychrométrique en kPa/°C

Pour les surfaces en eau, l'albedo retenu dans cette formule est 0,05. Pour les prairies c'est plutôt une valeur de 0,2 à 0,25 qu'il faut retenir, 0,1 à 0,12 pour les forêts et 0,16 à 0,26 pour les surfaces nues (roche, sables, ...).

¹ L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin) - Mohammad Aldomany - Soutenance le 12/09/2017 - École doctorale Sciences de l'homme et de la société - Orléans

- **Données des mailles SAFRAN-ISBA**

Météo France propose des données issues des modèles **SAFRAN-ISBA**, élaborées à l'échelle de mailles géographiques de 64 km² (8 x 8 km). Le modèle SAFRAN est un système d'analyse des variables atmosphériques, tandis qu'ISBA simule les interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère, fournissant ainsi des estimations d'évaporation.

Parmi les nombreuses données fournies, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est transmise. Cette donnée est issue de la formule de Penman calculée au pas de temps horaire, au droit d'une surface enherbée.

- **Méthode des bacs d'évaporation**

Il s'agit, sur un bac d'évaporation normalisé (bac de classe A), de mesurer régulièrement les effets de l'évaporation (baisse de la lame d'eau) avec prise en compte des apports météoriques.

Ce protocole de mesure nécessite des passages très réguliers pour effectuer les relevés et si besoin compléter en eau le dispositif (voire en enlever lorsque les précipitations sont importantes). Compte tenu de l'éloignement des sites, le passage journalier ou a minima tous les 3-4 jours n'était pas envisageable dans le cadre de cette étude. C'est pourquoi chaque bac a été équipé d'une sonde permettant un suivi « en continu » du niveau d'eau dans le bac (baisse liée à l'évaporation, hausse associée à une pluie).

L'installation de sondes de niveau d'eau sur les bacs d'évaporation, combinée aux stations météorologiques déployées pour l'étude, permet d'estimer théoriquement le volume évaporé sur le plan d'eau à l'aide de la formule suivante :

$$E = \Delta H - P$$

Avec :

- E : Evaporation en mm
- ΔH : Variation de hauteur dans le bac d'évaporation sur 24h (de 00:00 à 00:00) en mm
- P : Précipitations journalières en mm

Dans les faits, ces mesures ont été rendues très difficiles par la précision des enregistrements (précision de l'ordre de 2 à 5 mm) et par la fréquence des épisodes pluvieux rencontrés pendant la période d'instrumentation.

Les données interprétables pouvant être considérées comme fiables concernent des chroniques courtes pour lesquelles les phénomènes d'évaporation étaient importants (plusieurs mm par jour en situation estivale) et non compensés par des cumuls pluviométriques importants.

- **Application au bassin versant de la Sioule**

Les cinq méthodes d'évaluation de l'évaporation ont été mises en œuvre. Les calculs ont été effectués au pas de temps journalier.

Les résultats sont également présentés en cumuls décennaires et mensuels afin de permettre une meilleure comparaison entre les différentes méthodes.

La méthode du bac d'évaporation n'a pas été retenue pour l'évaluation de l'évaporation journalière en raison de la faible fiabilité des valeurs obtenues et des conditions exceptionnellement pluvieuses sur la période de suivi avec des précipitations récurrentes présentant des cumuls journaliers très souvent supérieurs à la lame d'eau évaporée.

L'analyse peut se faire toutefois sur des pas de temps plus longs, lors d'intervalles où la surverse du bac n'est pas effective et où les précipitations sont nulles ou très faibles. Cette situation a été constatée entre septembre et mi-octobre 2023 ainsi qu'entre la fin du mois de juillet et la fin août 2024. Pour le reste de l'année la fréquence des précipitations ne permet pas une évaluation de l'évaporation journalière.

On notera qu'une estimation de l'évaporation moyenne journalière entre deux passages sur le site est réalisée et comparée à celles évaluées par calcul météorologique avec des ordres de grandeurs plutôt cohérents selon les saisons (voir paragraphe 6.3.2.2 et 6.4.2.2).

6.3.2 Site de Lapeyrouse

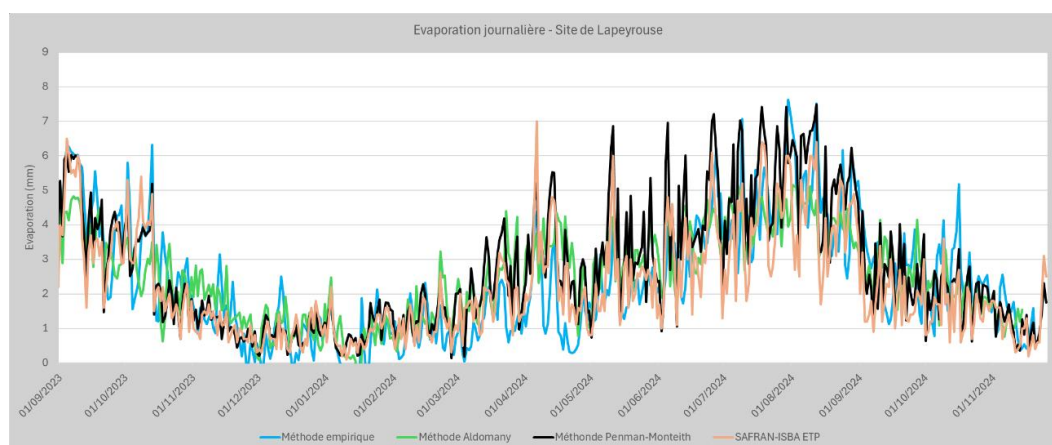
6.3.2.1 Résultats obtenus à partir des données climatiques

• Evaporation journalière

Les résultats montrent une cohérence globale entre les méthodes, avec des variations similaires au fil du temps. L'évaporation journalière varie entre 0 mm/jour et un maximum d'environ 7,5 mm/jour.

Les valeurs les plus élevées sont observées durant les périodes estivales (4 à 7 mm/j), ce qui est cohérent avec les conditions climatiques favorisant une évaporation accrue. À l'inverse, les valeurs en dessous de 1 mm/jour correspondent aux périodes hivernales, lorsque les températures et le rayonnement sont plus faibles.

Illustration 33 : Evaporation journalière sur le site de Lapeyrouse



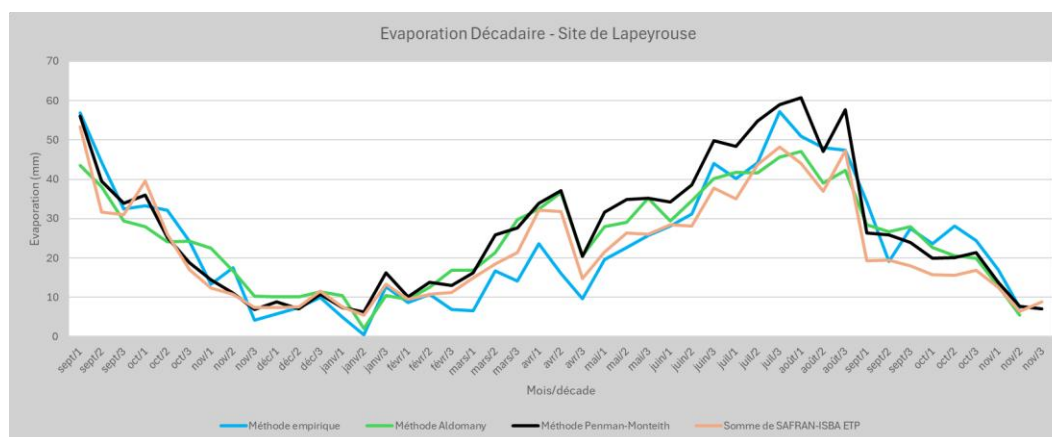
• Evaporation décadaire

Le graphique représentant l'évaporation décadaire montre une évolution plus lissée des valeurs par rapport à l'échelle journalière, ce qui permet de mieux observer les tendances saisonnières (voir Illustration 34). On remarque que la méthode empirique tend à proposer des valeurs d'évaporation plus basses durant les mois d'hiver par rapport aux autres méthodes.

Les données issues des mailles SAFRAN-ISBA, affichent des valeurs inférieures à celles obtenues via les mesures effectuées avec la station météorologique installée pour cette étude. Cette différence s'explique certainement par la résolution spatiale plus large des mailles SAFRAN-ISBA (64 km²), qui lisse les variations locales de climat ainsi que par la prise en compte d'un albedo sur prairie et non sur plan d'eau. Cette donnée brute, très facilement accessible, sur l'ensemble du territoire national doit être considérée comme simple alternative permettant d'évaluer un ordre de grandeur de l'évaporation en

cas d'absence de données climatiques plus complètes intégrant notamment, la température de l'air, la vitesse du vent, la puissance de l'ensoleillement, l'hydrométrie.

Illustration 34 : Evaporation décadaire sur le site de Lapeyrouse



• Evaporation mensuelle

Le graphique mensuel (voir Illustration 35) met clairement en évidence la variabilité saisonnière de l'évaporation. Celle-ci évolue d'environ 20 mm/mois durant les mois d'hiver à plus de 160 mm/mois pendant les mois d'août, soulignant l'impact des conditions climatiques saisonnières sur les processus d'évaporation.

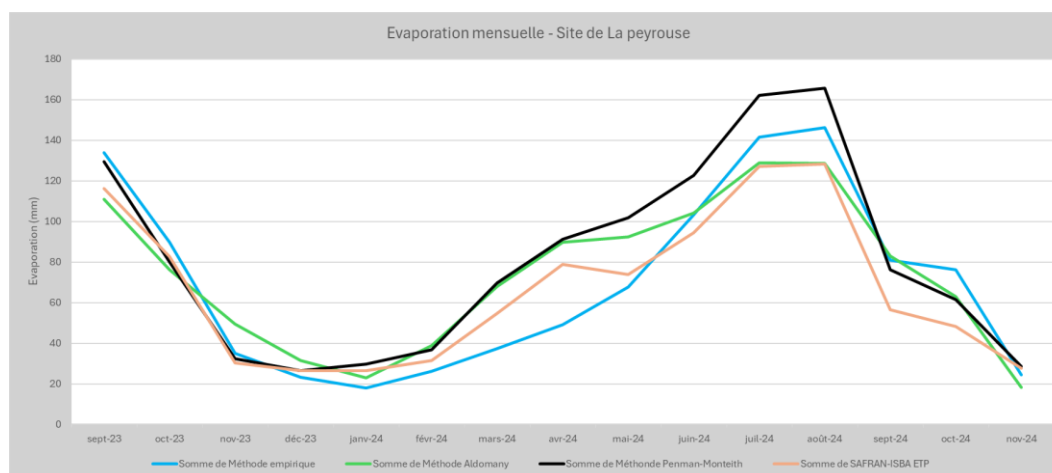
En comparant les différentes méthodes d'évaluation de l'évaporation, on observe que la méthode de Penman-Monteith fournit systématiquement les valeurs d'évaporation les plus élevées tout au long de l'année. Cette tendance peut s'expliquer par la prise en compte détaillée des paramètres météorologiques dans cette méthode, notamment la radiation solaire et la vitesse du vent.

En revanche, la méthode empirique se distingue par des résultats beaucoup plus bas en hiver, suggérant une sensibilité accrue à des conditions climatiques spécifiques. En été, cette méthode produit des valeurs relativement élevées, se rapprochant des estimations des autres approches. Cela laisse sous-entendre que cette méthode basée uniquement sur le vent et la température amplifie davantage les variations saisonnières que les autres méthodes utilisées ou n'est peut-être pas forcément adaptée aux territoires avec des températures hivernales froides.

De la même manière la méthode Aldomany, donne un cumul estival légèrement plus faible que celui issu de la formule de Penman-Monteith. Il est envisageable que cette formule développée pour les plans d'eau du Limousin ne reflète pas totalement les conditions climatiques estivales du bassin versant de la Sioule (journée présentant des situations caniculaires plus marquées en juillet et en août). Pour le reste de l'année les évaluations Penman-Monteith et Aldomany donnent des valeurs très proches

II

Illustration 35 : Evaporation mensuelle sur le site de Lapeyrouse



Sur la base de ces résultats et des commentaires précédents, nous pouvons considérer que les formules de Penman-Monteith (avec un albédo associé aux surfaces en eau) et d'Aldomany sont celles qui apparaissent le mieux adaptées pour évaluer les phénomènes d'évaporation sur les plans d'eau de la Sioule à partir de données météorologiques intégrant la mesure de la température de l'air, de la vitesse du vent, de la puissance de l'ensoleillement et de l'hydrométrie.

6.3.2.2 Mesures réalisées sur le bac d'évaporation

Comme évoqué précédemment l'évaluation quotidienne de lame d'eau évaporée sur le bac d'évaporation est rendue très difficile par la précision des enregistrements (précision de l'ordre de 2 à 5 mm) et par la fréquence des épisodes pluvieux rencontrés pendant la période d'instrumentation.

Pour illustrer cette situation, nous avons représenté sur le même graphique, au pas de temps décadaire et au pas de temps mensuel, le cumul pluviométrique et l'évaporation calculée avec les données climatiques (formule Penman-Monteith).

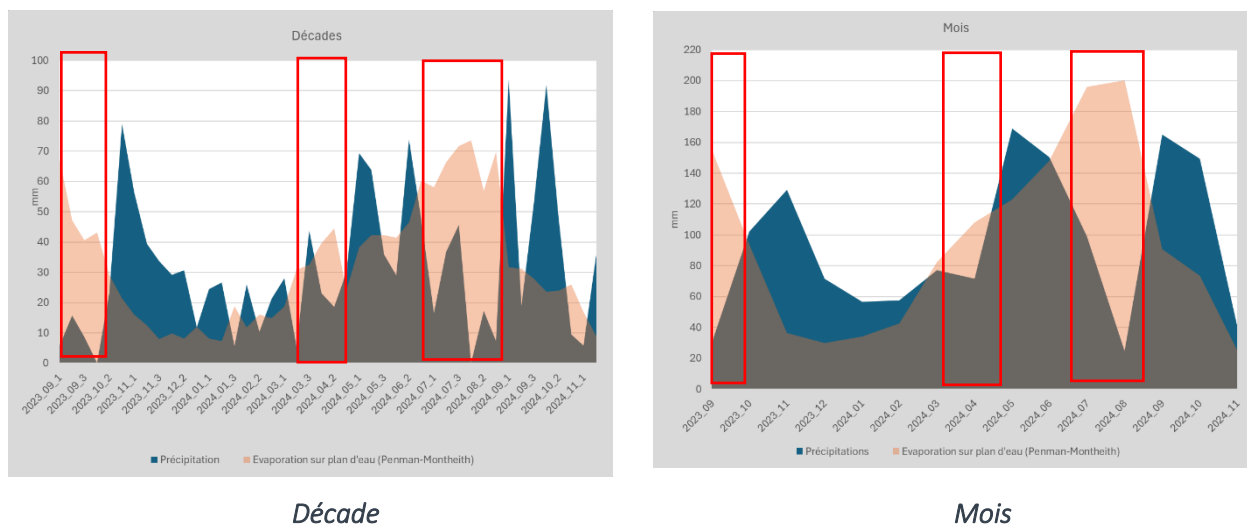
Pendant la période de suivi, les cumuls pluviométriques sont souvent proches voire dépassent très largement la lame d'eau évaporée.

Les périodes permettant l'évaluation précise de la lame d'eau évaporée depuis le bac d'évaporation se limite à la fin de l'été 2023, à une petite période au printemps 2024 ainsi aux mois juillet-août.

C'est d'ailleurs sur ces périodes que l'abaissement quotidien du niveau d'eau est bien visible (voir Illustration 37).

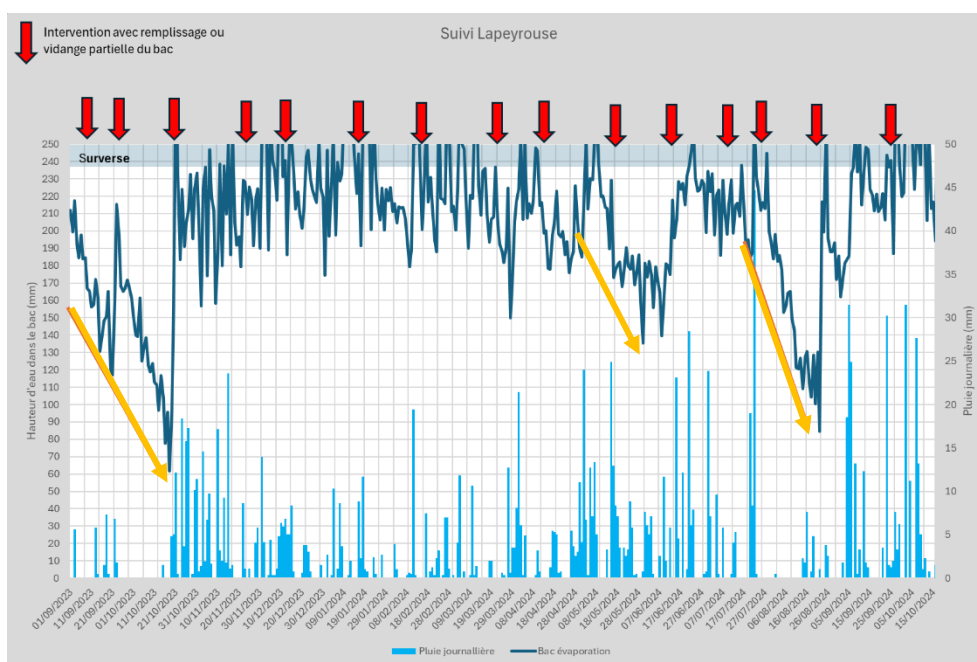
Retour d'expérience : dans le cadre de ce suivi, compte tenu des conditions climatiques, il aurait fallu privilégier le maintien d'un faible niveau d'eau dans le bac d'évaporation plutôt que de réaliser son remplissage, de peur d'un assèchement entre deux passages...

Illustration 36 : Comparaison entre cumul évaporé et cumul pluviométrique



En rouge : Période où les précipitations ne viennent pas trop perturber la mesure de l'évaporation depuis les bacs d'évaporation.

Illustration 37 : Evaluation de l'évaporation journalière depuis le bac d'évaporation – Site de Lapeyrouse

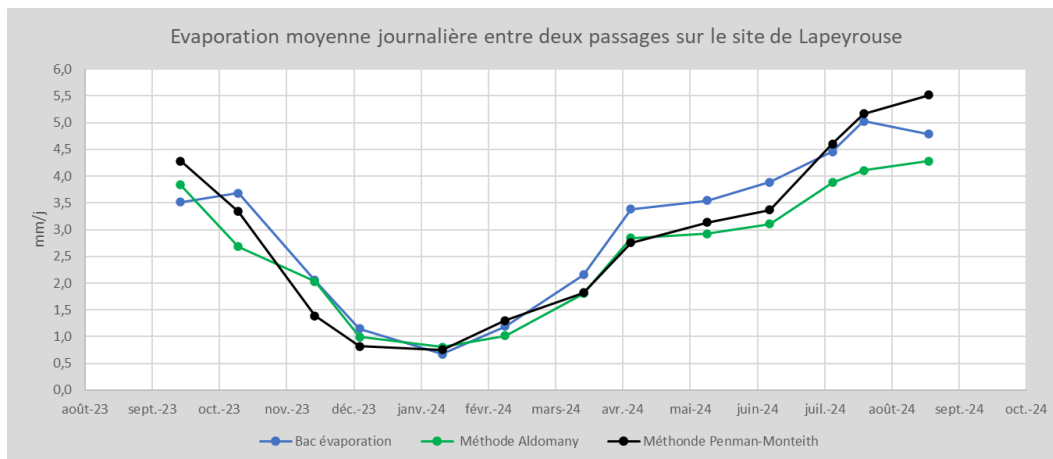


A partir des niveaux d'eau mesurés entre chaque passage, des cumuls pluviométriques et des périodes où le bac surversait, nous avons toutefois essayé d'évaluer une lame d'eau évaporée. Malgré les incertitudes liées à cette analyse, celle-ci reste comparable avec ce qui est évalué avec les données climatiques (voir Illustration 38).

On retiendra pour le site de Lapeyrouse :

- Une évaporation moyenne de l'ordre de 0,5 à 1 mm par jour en période hivernale (Décembre-Janvier)
- Une évaporation moyenne de l'ordre 4 à 6 mm/jour en période estivale (Juillet-Août-Septembre)
- Une évaporation moyenne de l'ordre de 1,5 à 3,5 mm/jour le reste de l'année

Illustration 38 : Comparaison entre les différentes méthodes d'évaluation ou de mesure de l'évaporation



6.3.3 Site de Gouttières

6.3.3.1 Résultats obtenus à partir des données climatiques

Toutes les remarques et commentaires faits pour le site de Lapeyrouse sont également valables pour le site de Gouttières.

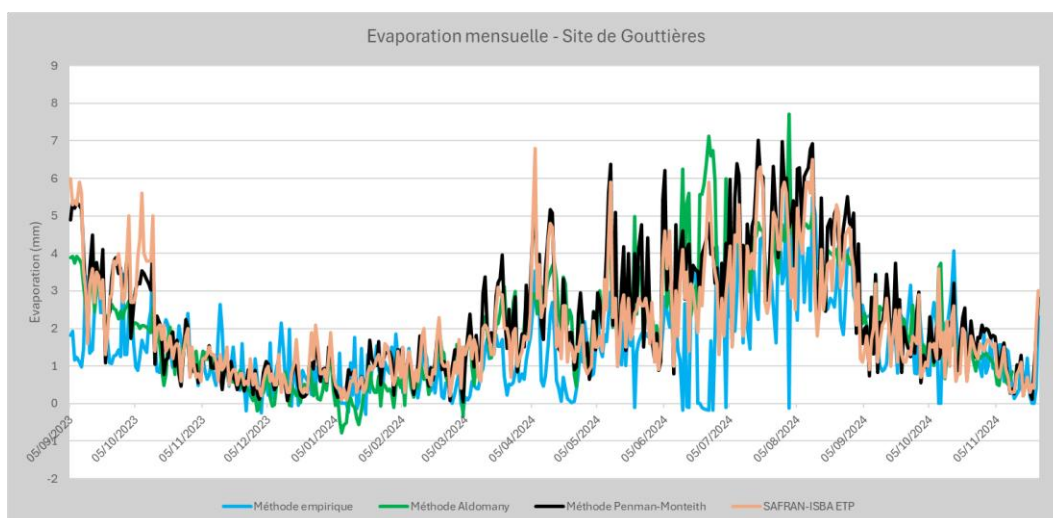
• Evaporation journalière

L'évaporation journalière est très faible l'hiver (parfois 0 mm/j) ; elle peut atteindre 7 mm/jour en été.

La formule de Penman-Monteith donne les valeurs souvent les plus élevées quelle que soit la saison.

A l'opposé, la méthode empirique propose une évaporation particulièrement basse en hiver et des anomalies en été. Les commentaires faits précédemment pour le site de Lapeyrouse restent valables.

Illustration 39 : Evaporation journalière - Site de Gouttières

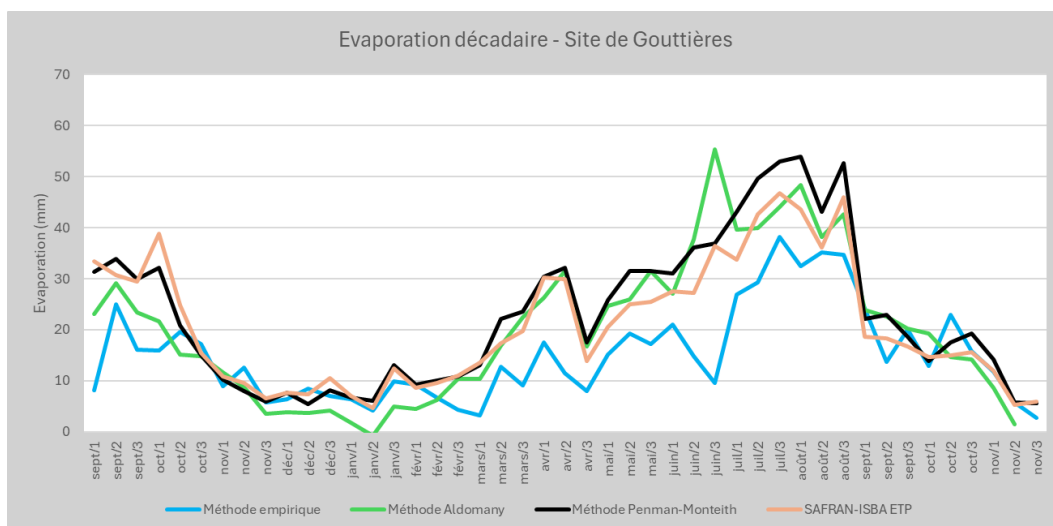


- **Evaporation décadaire**

On observe une évolution saisonnière caractéristique : les valeurs d'évaporation sont faibles durant l'hiver, autour de 0 à 10 mm par décade, et augmentent progressivement au printemps, pour atteindre des maximums durant l'été, avec des valeurs dépassant les 50 mm par décade sur certaines périodes.

En automne, les valeurs décroissent rapidement.

Illustration 40 : Evaporation décadaire - Site de Gouttières

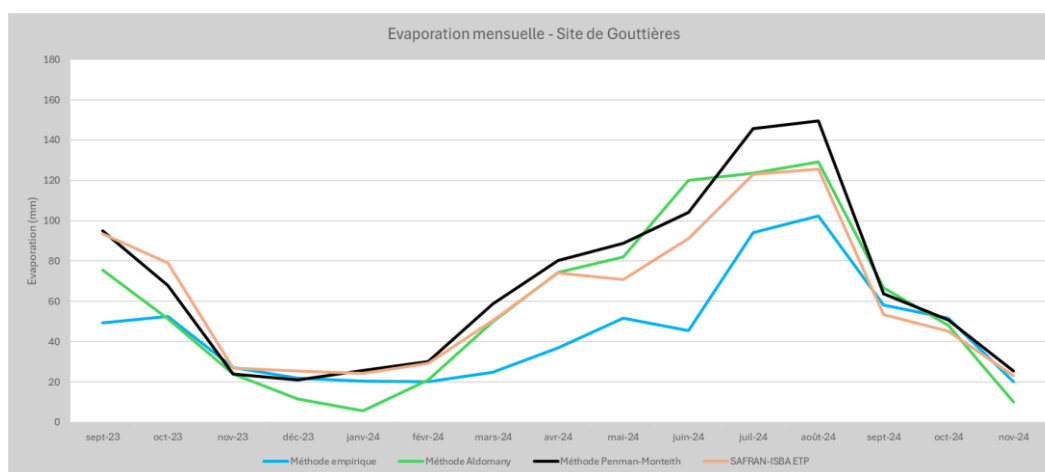


• Evaporation mensuelle

L'évaporation mensuelle sur le site de Gouttières montre des valeurs beaucoup plus lissées, ce qui met en évidence les variations saisonnières de manière claire. On observe un pic d'évaporation en août, quel que soit le modèle utilisé, avec des valeurs allant de 100 mm (méthode empirique) à près de 150 mm (méthode Penman-Monteith). En hiver, les valeurs restent basses pour toutes les méthodes, avec une évaporation inférieure à 20 mm par mois.

La méthode SAFRAN ISBA ainsi que la méthode empirique semblent sous évaluer à certains moments de l'année les phénomènes d'évaporation (voir commentaire site de Lapeyrouse).

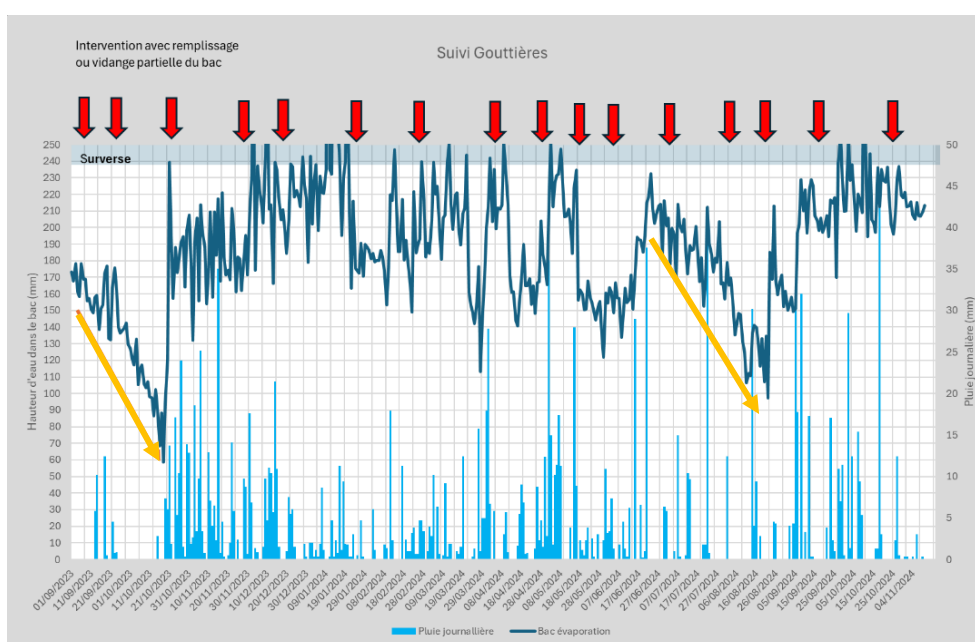
Illustration 41 : Evaporation mensuelle - Site de Gouttières



6.3.3.2 Mesures réalisées sur le bac d'évaporation

On observe les mêmes contraintes que sur le site de Lapeyrouse pour l'évaluation de l'évaporation depuis le bac d'évaporation (voir Illustration 42).

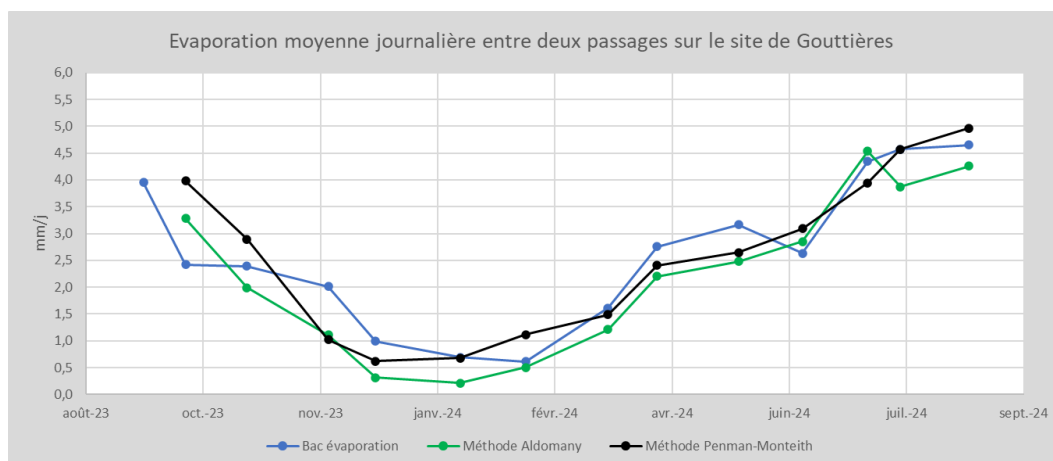
Illustration 42 : Evaluation de l'évaporation journalière depuis le bac d'évaporation – Site de Gouttières



Tous les éléments décrits dans le paragraphe 6.3.2.2 sont également applicables pour ce site.

L'évaluation de la hauteur d'eau évaporée entre deux passages donne des ordres de grandeur comparables avec celles calculées à partir de données météorologiques (voir illustration ci-dessous).

Illustration 43 : Comparaison entre les différentes méthodes d'évaluation ou de mesure de l'évaporation



6.3.4 Synthèse

La quantification des phénomènes d'évaporation sur les deux sites met en évidence des dynamiques saisonnières similaires, avec des valeurs basses en hiver et des pics marqués durant l'été. Les différentes méthodes utilisées montrent des tendances globalement cohérentes, bien que des écarts existent en fonction des modèles et des paramètres climatiques pris en compte.

Les méthodes Penman-Monteith et Aldomany permettent d'évaluer assez précisément les hauteurs d'eau évaporée sur les plans d'eau. Elles tendent à fournir les estimations proches de celles évaluées par mesure sur les bacs d'évaporation (voir Illustration 38 et Illustration 43) et présentent le grand intérêt de pouvoir être mises en œuvre au pas de temps journalier, permettant ensuite un traitement à la décade ou au mois.

La comparaison entre les deux sites sur la base de la méthode Penman-Monteith (la plus fiable à notre sens) donne des valeurs très proches avec des écarts compris entre 10 et 20% selon les mois (voir Illustration 44). Ces écarts sont principalement liés aux conditions plus ventées rencontrées sur le site de Lapeyrouse qui augmentent la lame d'eau évaporée à la surface du plan d'eau (voir Illustration 24 et Illustration 30).

Illustration 44 : Comparaison entre les deux sites exprimée en mm/mois ou en mm/j

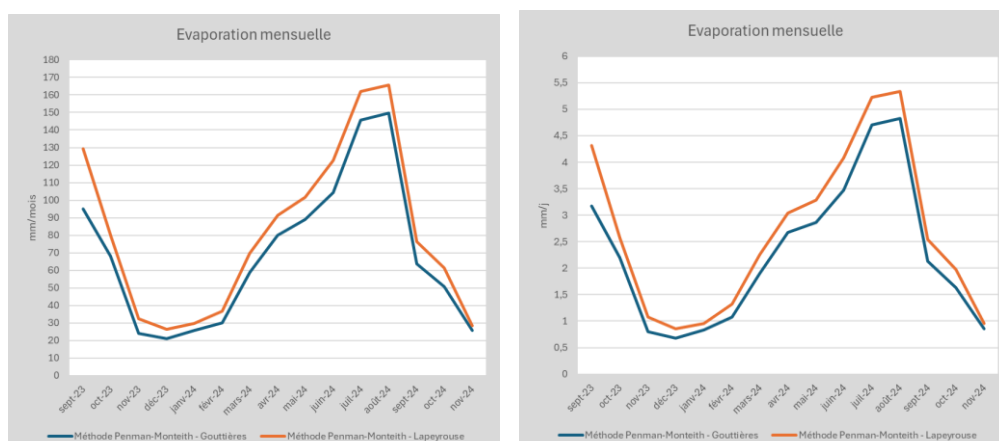


Tableau 2 : Pertes par évaporation sur la surface des plans d'eau sur la période septembre 2023-octobre 2024

	Lapeyrouse	Gouttières	Lapeyrouse	Gouttières	
	Méthode Aldomany	Méthode Aldomany	Méthode Penman-Monteith	Méthode Penman-Monteith	
	mm/mois	mm/mois	mm/mois	mm/mois	
sept.-23	111	76	129	95	
oct.-23	76	52	80	68	
nov.-23	49	24	32	24	
déc.-23	31	12	27	21	
janv.-24	23	6	30	26	
févr.-24	39	21	37	30	
mars-24	68	50	70	59	
avr.-24	90	75	91	80	
mai-24	92	82	102	89	
juin-24	104	120	123	104	
juil.-24	129	124	162	146	
août-24	128	129	166	150	
sept.-24	83	67	76	64	
oct.-24	63	48	61	51	
nov.-24	18	10	29	26	

Lapeyrouse	Gouttières	Lapeyrouse	Gouttières	MOYENNE
Méthode Aldomany	Méthode Aldomany	Méthode Penman-Monteith	Méthode Penman-Monteith	
mm/j	mm/j	mm/j	mm/j	mm/j
3,7	2,5	4,3	3,2	3,4
2,5	1,7	2,7	2,3	2,3
1,6	0,8	1,1	0,8	1,1
1,0	0,4	0,9	0,7	0,8
0,8	0,2	1,0	0,9	0,7
1,3	0,7	1,2	1,0	1,1
2,3	1,7	2,3	2,0	2,1
3,0	2,5	3,0	2,7	2,8
3,1	2,7	3,4	3,0	3,0
3,5	4,0	4,1	3,5	3,8
4,3	4,1	5,4	4,9	4,7
4,3	4,3	5,5	5,0	4,8
2,8	2,2	2,5	2,1	2,4
2,1	1,6	2,0	1,7	1,9
0,6	0,3	1,0	0,9	0,7

On retiendra comme ordre de grandeur sur le bassin versant de la Sioule :

- Une évaporation moyenne de l'ordre de 0,5 à 1 mm par jour en période hivernale (Novembre - Décembre - Janvier) ;
- Une évaporation moyenne de l'ordre 4 à 6 mm par jour en période estivale (Juillet-Août-Septembre) ;
- Une évaporation moyenne de l'ordre de 1,5 à 3,5 mm par jour le reste de l'année.

6.4 Bilan hydroclimatique

Les phénomènes d'évaporation sur plans d'eau sont effectifs tant qu'il y a de l'eau dans la retenue. La lame d'eau évaporée est par principe plus importante que celle utilisée par le couvert végétal dans la mesure où le phénomène dispose en permanence d'eau, contrairement aux plantes qui par exemple en période estivale, peuvent subir un manque d'eau remettant en cause les phénomènes d'évapotranspiration.

Sur la base de ce principe, à surface équivalente, les plans d'eau génèrent potentiellement un déficit d'écoulement pour le réseau hydrographique qui est plus important que celui généré par les surfaces végétalisées.

Les éléments présentés ci-après ont pour objectifs d'évaluer l'ampleur de ce déficit sur la zone d'étude pendant la période de suivi.

6.4.1 Méthode de calcul

L'évapotranspiration potentielle (ETP) sur un couvert végétal de type prairie agricole, couvert dominant sur la zone d'étude, peut être également calculée en utilisant la formule de Penman Monteith sous réserve de retenir un albedo adapté à ce type de couverture de sol.

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale d'eau qui pourrait être évaporée et transpirée par une surface végétalisée bien irriguée, dans des conditions climatiques optimales. Avec ces

conditions respectées, le cycle de croissance de la plante est optimal et elle ne subit pas de stress hydrique.

En cas de manque d'eau, le stress hydrique intervient (fermeture des stomates) et la quantité d'eau utilisée par la plante est moindre. L'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée par une plante dans ces conditions réelles.

A partir des données « Précipitations » et « Evapotranspiration potentielle (ETP) », il est alors possible de réaliser un bilan hydroclimatique permettant de calculer la pluie efficace (Peff), c'est-à-dire la lame d'eau qui sera disponible pour le ruissellement (R) et l'infiltration (I), et l'état de la réserve utile dans le sol.

La pluie efficace correspond à la pluie totale de laquelle a été retranchée l'évapotranspiration réelle (ETR) calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) évaluée à partir de données issues d'une station météorologique.

$$\text{Peff (lame d'eau)} = P - \text{ETR} = I + R$$

En effet, l'ETP est satisfaite par les précipitations et par la réserve facilement utilisable contenue dans les sols (RFU). En cas d'absence de précipitation, la plante sollicite la réserve du sol pour satisfaire son besoin en eau. En période estivale, cette réserve peut rapidement diminuer au point de vider la réserve. **En l'absence d'eau disponible, l'ETR sera alors inférieure à l'ETP voire nulle.** Seul un retour des précipitations permet la recharge de la réserve qui selon les conditions climatiques et l'intensité des phénomènes d'évapotranspiration se déstocke ou se remplit.

Les paramètres intervenant dans le calcul du bilan hydroclimatique sont les suivants :

- **Pluie** : données station météorologique,
- **Pluie corrigée** : En fonction de l'intensité pluvieuses et de la perméabilité des sols, une partie de la lame d'eau ruisselle directement vers le réseau hydrographique et ne participe pas à l'alimentation en eau du complexe « sol-plante »
- **ETP** : Paramètre calculé à partir des données de la station météorologique
- **ETP corrigée** (ETPc). Fonction du type de plantes avec $\text{ETPc} = \text{ETP} \times K_c$

Le coefficient cultural (K_c) permet de corriger la valeur de l'ETP selon le type de couvert végétal ou de cultures. **Il est variable dans l'année selon le degré de croissance de la plante.** Il est établi pour de nombreuses cultures et espèces végétales et est présenté sous la forme d'abaque annuel, mensuel ou décadaire.

Pour un couvert végétal prairial faisant l'objet de pratiques agricoles « intensives » (prairies temporaires avec fauches et pâturages réguliers), le coefficient cultural retenu est le suivant :

Tableau 3 : Coefficient cultural (K_c) pour une prairie de graminées

	Janvier			Février			Mars			Avril			Mai			Juin		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Coefficient cultural K_c	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	Juillet			Août			Sept			Oct			Nov			Déc		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,1	1,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Commentaire :

• Prairie de graminées :

Les besoins en eau augmentent avec la reprise végétative en sortie d'hiver ($K_c = 1,1$).

En été et en situation de ressource en eau contrainte (problème de disponibilité ou de coût), il est envisageable de restreindre la culture ($K_c = 0,6$).

Reprise d'une alimentation en eau non limitante en septembre en vue d'une 3ème coupe ou pâturage.

Les besoins en eau sont réduits après cette dernière coupe ou pâturage ($K_c = 0,6$).

Source : BRL- Memento irrigation – partie 5

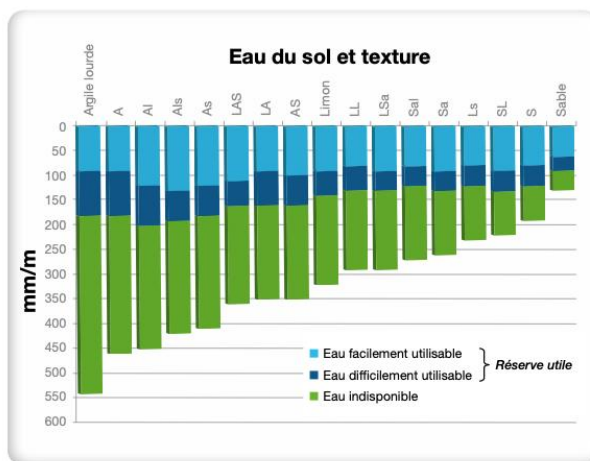
- **Réserve du sol** : réserve utile (RU) et réserve facilement utilisable (RFU). Ces paramètres sont fonction de la nature des sols, de leur capacité de drainage (une fois la réserve pleine au niveau du système racinaire l'excédent apporté par la pluie ruisselle ou s'infiltre et n'est plus exploitable par la végétation) et de la profondeur d'enracinement de la végétation.

La réserve utile (RU) pour un sol non caillouteux varie dans la gamme suivante :

- De 0,9 à 1,2 mm/cm pour une texture grossière à dominante sableuse,
- De 1,3 à 1,6 mm/cm pour une texture moyenne
- De 1,8 à 2 mm/cm pour une texture fine (argile, argilo-limoneux, argilo-sableux)

La réserve facilement utilisable (RFU) par le couvert végétal est généralement comprise entre 1/2 et 2/3 de la réserve utile. C'est au niveau des textures les plus argileuses que le ratio entre réserve facilement utilisable et réserve utile est le plus faible.

Illustration 45 : Réserve Utile des sols en fonction de leur texture



Source : Mémento Irrigation –
BRL – Mars 2019

Lorsque ces paramètres ne sont pas évaluables, il est habituellement admis de retenir 1 mm / cm d'enracinement pour la réserve facilement utilisable (RFU).

Pour une prairie permanente, avec une profondeur moyenne d'enracinement de l'ordre de 30 à 50 cm sur un sol de texture moyenne variée (SA à LSA dans le bassin versant de la Sioule), une RU de 75 mm et une RFU de l'ordre 50 mm peuvent être envisagées.

• Méthode de calcul d'un bilan hydroclimatique :

- 1) La totalité des précipitations (P) s'ajoute à la réserve facilement utilisable (RFU) actuelle du sol pour constituer l'« eau disponible » qui alimente l'évapotranspiration
- 2) L'évapotranspiration réelle (ETR) joue sans restriction, jusqu'à concurrence de l'ETP, tant que « l'eau disponible » est supérieure ou égale à l'ETP.
- 3) Si ce n'est pas le cas, l'ETR utilise alors uniquement la lame d'eau disponible.
- 4) Selon les conditions climatiques, la RFU se déstocke pour satisfaire l'évapotranspiration s'il s'agit de la seule « eau disponible » ou au contraire se remplit avec l'excédent des précipitations non utilisé par l'évapotranspiration. Si la RFU est déjà maximale, l'excédent est alors considéré comme une pluie efficace (Peff) (= part des

précipitations qui est non reprise par la végétation participant à l'infiltration profonde ou au ruissellement).

Cette méthode de calcul, pouvant être réalisée au pas de temps quotidien dans le cadre d'une gestion d'arrosage et d'irrigation de cultures, surestime à certains moments la part des précipitations participant à l'évapotranspiration des plantes et/ou selon la saison à la recharge de la RFU.

En effet, selon l'intensité de la précipitation, une part parfois significative peut ruisseler directement vers le réseau hydrographique sans interaction avec le complexe « sol-plante » du fait de la saturation superficielle (sensibilité à l'érosion de l'horizon de surface et prédominance des phénomènes de battance). Pour apporter plus de précision à ce calcul, il faudrait attribuer un coefficient de correction à la pluie journalière qui serait fonction des intensités et de la durée des épisodes pluvieux et de la perméabilité du sol (paramètre évolutif selon l'état de saturation et la durée de l'épisode pluvieux).

Par exemple une pluie journalière de 30 mm peut s'infiltrer totalement dans les sols si elle s'étale sur la journée alors qu'au contraire elle peut majoritairement ruisseler si elle tombe sous la forme d'un orage d'une heure en fonction de la perméabilité des sols rencontrés.

Pour les calculs du bilan hydroclimatique, nous avons considéré que la perméabilité moyenne des sols rencontrés sur la zone d'étude se situait dans une gamme comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s compte tenu de leur texture. A partir de cette hypothèse, nous avons donc considéré que toutes les précipitations dépassant 5 mm/h alimentait directement le ruissellement et ne participait pas à l'alimentation en eau des plantes.

Illustration 46 : Perméabilité des sols en fonction de leur texture

Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique (K) des différents sols (Musy & Soutter, 1991)

K (m/s)	1E-11	1E-10	1E-09	1E-08	1E-07	1E-06	1E-05	1E-04	1E-03	1E-02	1E-01
K (mm/h)	0,000036	0,00036	0,0036	0,036	0,36	3,6	36	360	3600	36000	360000
K (mm/j)	0,000864	0,00864	0,0864	0,86	8,64	86,4	864	8640	86400	864000	8640000
Type de sols	Argile homogène à argile limoneuse			Limon argileux à limons grossier Sable très fin			Sable fin à sable grossier Sable avec gravier		Gravier sans sable ni éléments fins		
Possibilité d'infiltration	NULLE à FAIBLE			FAIBLE à MOYENNE			BONNE		EXCELLENTE		
ZONE D'ETUDE						Gamme concernée sur la zone d'étude					

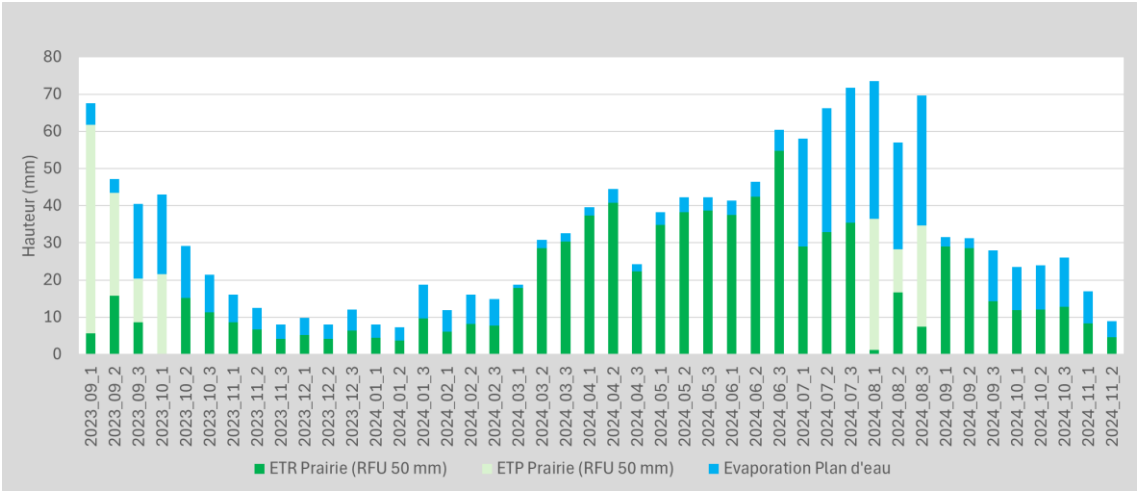
- PERMEABLE

+ PERMEABLE

6.4.2 Application à la zone d'étude

Les calculs ont été réalisés au pas de temps décadaire à partir des données climatiques de la station météorologique de Lapeyrouse en considérant les différentes hypothèses décrites précédemment (pluie corrigée, ETP corrigée, RFU). Les résultats sont présentés sur l'illustration suivante :

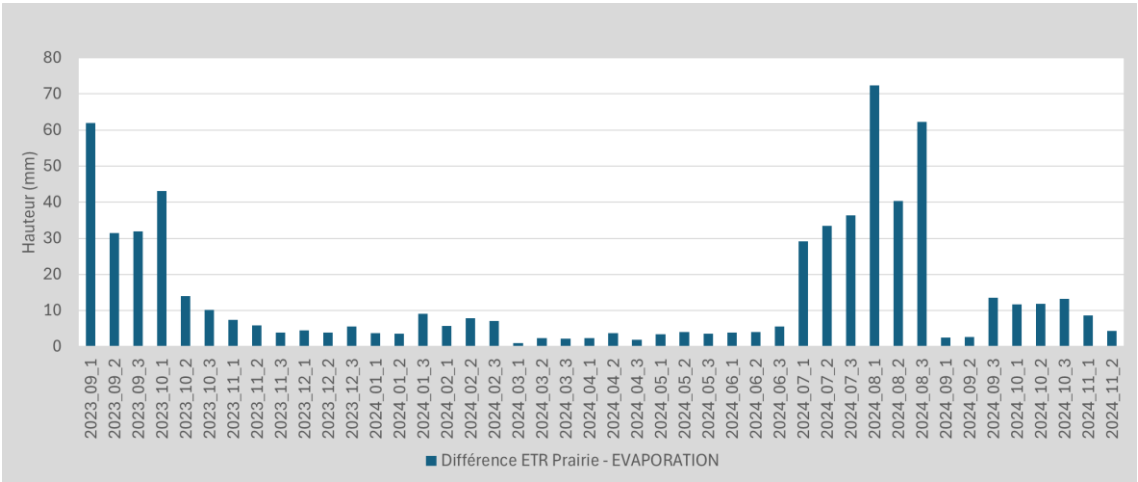
Illustration 47 : Lame d'eau associée aux phénomènes d'évaporation sur plans d'eau ou d'évapotranspiration des plantes – Bilan par décade



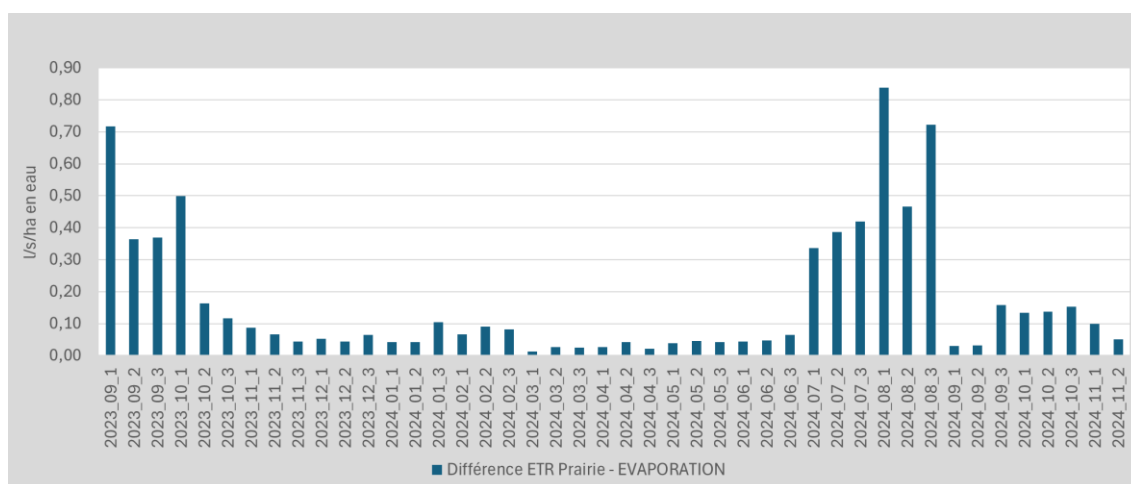
Cette illustration met en évidence la baisse significative de l'évapotranspiration des plantes en situation d'étiage sévère (écart entre ETP et ETR). Ce phénomène bien visible à la fin de l'été 2023 l'est beaucoup moins au cours de l'été 2024 (hors mois d'août), compte tenu des conditions climatiques pluvieuses.

La différence entre évapotranspiration réelle des plantes (ETR) et évaporation « plan d'eau » (écart entre la représentation bleue et la verte foncée sur l'illustration 47) pourrait être considérée comme un déficit d'écoulement pour le réseau hydrographique lié à la présence de plan d'eau. Ce déficit peut être exprimé en mm ainsi qu'en l/s/ha de surface en eau (voir les deux graphiques de l'illustration suivante).

Illustration 48 : Evaluation du déficit d'écoulement apporté par les plans d'eau par rapport aux prairies – Bilan par décade



Expression en mm



Expression en l/s/ha en eau

Le déficit d'écoulement pour le réseau hydrographique lié à la présence de plan d'eau, se fait essentiellement ressentir en période estivale. Cette perte peut être évaluée entre 0,3 et 0,8 l/s/ha de surface en eau.

On précisera que cette notion de déficit est « à nuancer » et reste fonction des conditions hydrologiques en amont de chaque plan d'eau, du mode de fonctionnement, des équipements en place et des éventuelles pertes au niveau de la digue ou de l'ouvrage de vidange,

Lors d'étiage sévère (débit entrant inférieur au débit réservé (calé généralement au 1/10 du module), le débit restitué /en aval d'un **plan d'eau, situé en travers d'un cours d'eau**, peut être :

- **inférieur à ce qui rentre.** Cette situation est rencontrée lorsque le débit d'évaporation est supérieur au débit d'alimentation et/ou que la prise d'eau de restitution se trouve par exemple au dessus du niveau du plan d'eau par effet de maranage.
- **égal à ce qui rentre.** Ce mode de fonctionnement nécessite une intervention humaine régulière pour adapter le débit sortant du plan d'eau (sous réserve que celui-ci dispose d'équipements permettant cette régulation).
- **supérieur à ce qui entre.** Cette situation peut notamment être le cas lorsque les plans d'eau présentent des fuites et/ou un dispositif de drainage du cœur de digue et/ou un équipement garantissant a minima la sortie du débit réservé quelles que soient les conditions hydrologiques du moment (exemple d'un ajutage dans les planches d'un moine).

Pour la première situation ,les pertes constituent potentiellement un « manque à gagner » pour le cours d'eau en aval (situation à confirmer par le suivi hydrologique).

Ce manque à gagner intervient également lors du remplissage post-estival venant compenser cette perte par évaporation ainis que le déstockage d'eau lié par exemple aux pertes (effet du marnage à compenser).

6.5 « Hydrologie » - Données collectées et interprétation

6.5.1 Reconstitution des débits aux points de mesure

La méthodologie mise en œuvre pour le traitement des données s'appuie sur les éléments présentés dans le paragraphe 5.

Les jaugeages ponctuels ont été réalisés pour différentes situations hydrologiques, couvrant les très basses eaux jusqu'aux moyennes eaux, notamment pour fiabiliser le suivi des basses eaux.

L'utilisation d'un seuil triangulaire présente l'intérêt de permettre une mesure fiable des débits faibles (quelques l/s correspondant à la gamme de valeur des débits des cours d'eau étudiés en période estivale). Le tableau ci-dessous précise la gamme de débit pour laquelle des mesures au courantomètre ont été réalisées pour l'établissement des courbes de tarage.

Afin de comparer les différents territoires (« témoin » et « plan d'eau »), les débits calculés sont ensuite transformés en débits spécifiques (= débits/superficie du bassin versant).

Tableau 4 : Gamme de débit (et indirectement de hauteur déversée) pour laquelle des mesures de débit au courantomètre ont été réalisées

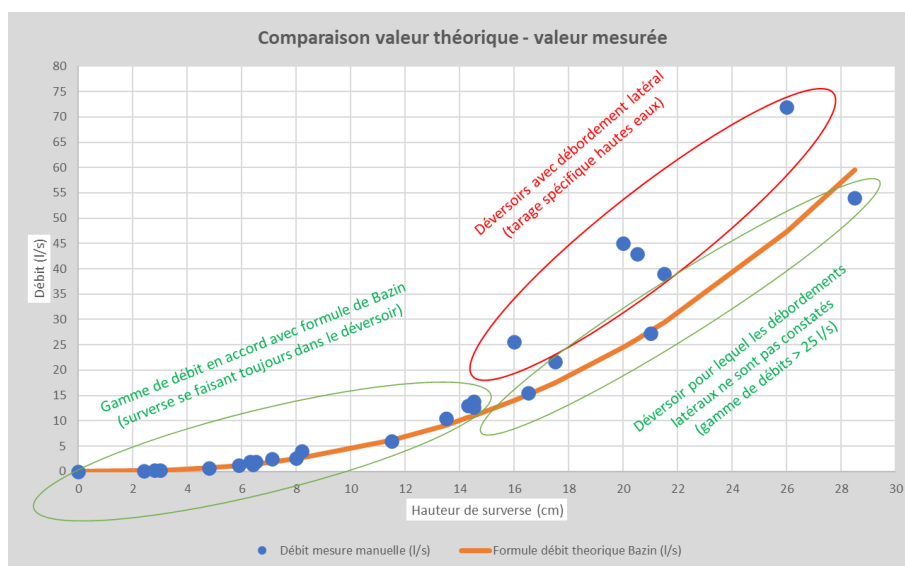
		LAP_PE_AM	LAP_PE_AV	LAP_TE_AM	LAP_TE_AV		GOUT_PE_AM	GOUT_PE_AV	GOUT_TE_AM	GOUT_TE_AV
Taille du bassin versant	ha	39	450	104	524		95	310	96	197
Minimum	l/s	0	0,1	0	0		2,4	8	0,7	1,1
Maximum	l/s	10	190	30	240		30	121	43	87
Minimum	l/s/km ²	0	0,02	0	0		2,5	2,6	0,7	0,6
Maximum	l/s/km ²	26	42	29	46		32	39	45	44

Les plus hautes valeurs de mesures de débit au courantomètre sont associées à des valeurs de l'ordre de 30 à 45 l/s/km².

Aucun jaugeage n'a été réalisé en période de forts débits (périodes très pluvieuses). Les courbes de tarage sont donc très souvent extrapolées pour les hautes voire très hautes eaux, sans donnée de calage. Ceci ne remet toutefois pas en cause l'analyse présentée ci-après, centrée particulièrement sur les plus bas débits.

Ces mesures permettent également de s'assurer que la formule hydraulique de Bazin liée au déversoir triangulaire (dispositif mis en place pour le suivi) reste dans son domaine de validité. En effet dans le cas présent, la formule apparaît fiable lorsque les débits mesurés sont dans la gamme 0- 20 l/s. En effet, il s'agit de la gamme pour laquelle l'écoulement passe dans son intégralité dans le déversoir. En situation de hautes eaux, des débordement latéraux ont été constatés sur certains points de mesures. La formule applicable au déversoir triangulaire doit généralement être adaptée dès que les débits dépassent les 20-30 l/s (voir illustration ci-dessous).

Illustration 49 : Hauteur d'eau déversée - Débit - Formule de Bazin



Conseil de lecture pour les graphiques présentés dans les paragraphes 6.5.2 et 6.5.3 : Les chroniques de débits présentées avec une représentation en couleur « chaude » (orange-rouge) sont toujours associées aux bassins versants « plan d'eau » alors que celles en couleur « froide » (bleu, vert) sont associées aux bassins versants « témoin ».

6.5.2 Présentation des résultats - Site de Lapeyrouse

Pour rappel la dénomination des stations de suivi est la suivante :

- Bassin versant « Plan d'eau – Amont » : LAP_PE_AM – bassin versant de 39 ha ;
- Bassin versant « Plan d'eau – Aval » : LAP_PE_AV – bassin versant de 450 ha ;
- Bassin versant « Témoin – Amont » : LAP_TE_AM – bassin versant de 104 ha ;
- Bassin versant « Témoin – Aval » : LAP_TE_AV – bassin versant de 524 ha ;

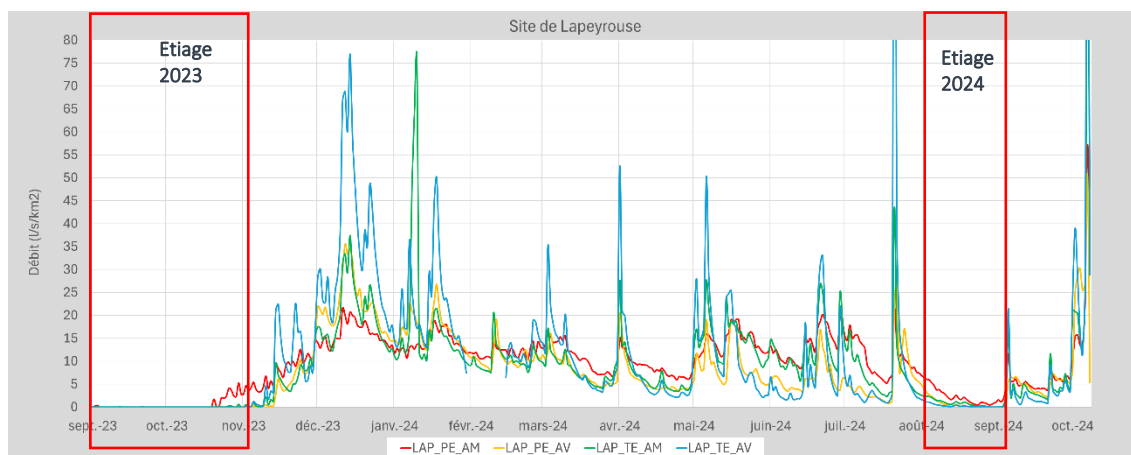
Sur le site de Lapeyrouse, les débits spécifiques sont relativement équivalents entre les deux bassins versants (« plan d'eau » et « témoin »).

Le témoin aval (LAP_TE_AV) présente cependant des mesures de débits spécifiques en période de hautes eaux qui peuvent être discutables par rapport au reste des points de mesure (voir commentaire ci-après).

Néanmoins, les débits en basses eaux (0-5 l/s/km²), moyennes eaux (10-15 l/s/km²) et hautes eaux (25-50 l/s/km²) apparaissent corrects et cohérents pour l'ensemble des points.

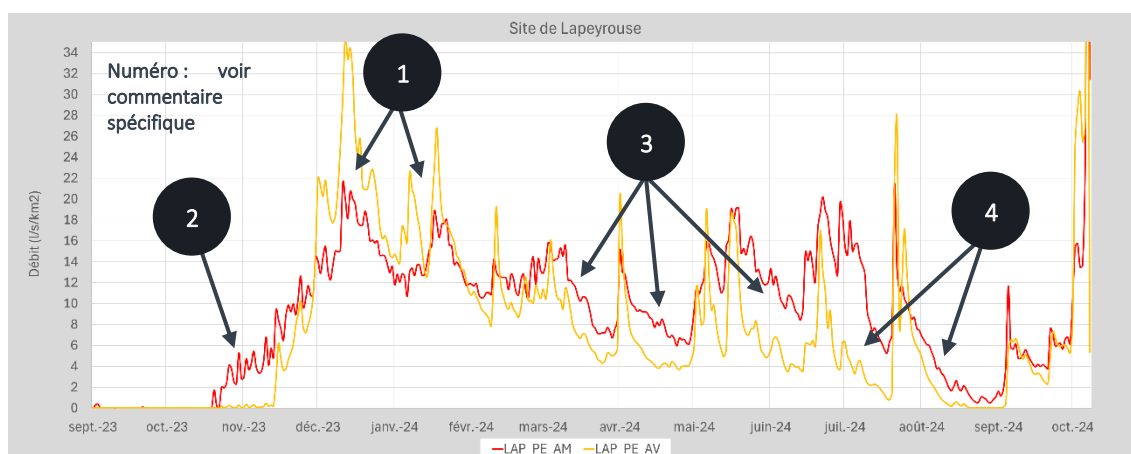
Illustration 50 : Débits spécifiques sur le site de Lapeyrouse

• Ensemble des mesures



Remarque : Compte tenu des incertitudes sur les débits en hautes eaux, les graphiques présentés ci-après présentent une ordonnée maximale limitée à 35 l/s/km² (en lien avec les éléments présentés dans le Tableau 4).

• Suivi bassin versant « plan d'eau »



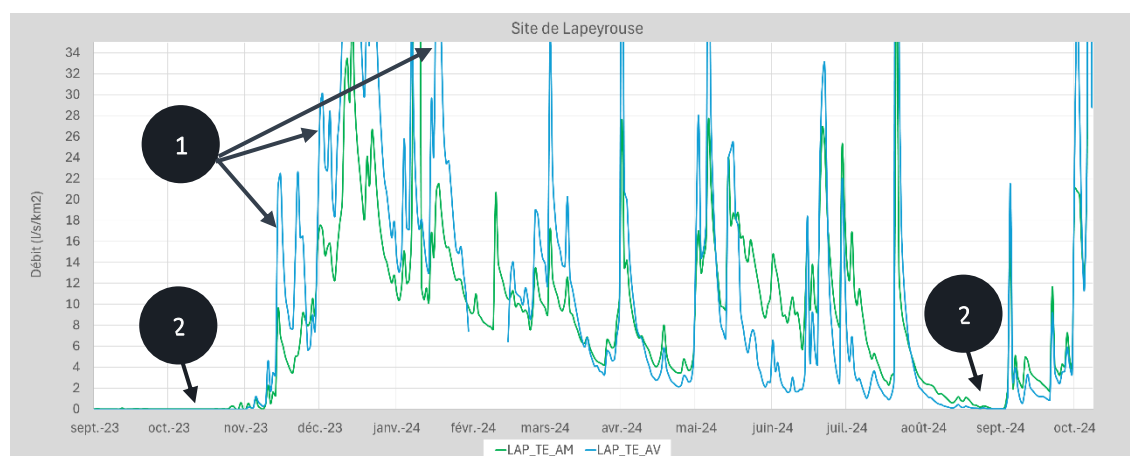
Les principales informations mises en évidence par ce suivi sont les suivantes :

- **1** – Le point de suivi amont présente des fluctuations moins marquées et plus amorties. Cette situation est probablement en lien avec le positionnement de la station, au niveau d'un ancien plan d'eau, réhabilité en zone humide et aux effets de ce type de milieu dans la restitution des écoulements.
- **2** – On assiste à une reprise des écoulements, après l'étiage exceptionnel de 2023, plus rapide et plus marquée sur la station amont par rapport à la station aval. **L'écart de temporalité est de l'ordre de 3 semaines.** Cette situation s'explique par l'abaissement des niveaux des plan d'eau pendant l'été (débit réservé + évaporation + fuites) et le phénomène de remplissage des retenues avant que celles-ci ne

redeviennent « transparentes » dans la restitution des débits vers l'aval (le marnage constaté au niveau du plan d'eau communal a atteint près de 60 cm sur cette période).

- ③ – Le fonctionnement « hydrologique » en aval des plans d'eau présente une décroissance plus rapide qu'en amont. Cette situation est probablement en lien avec la présence du vallon humide en amont qui joue un rôle tampon dans la restitution des écoulements (=phénomène inverse du commentaire 1)
- ④ – Lors de l'été 2024 (juillet et août), un déficit d'écoulement de l'ordre de 2 à 6 l/s/km² est constaté entre le point amont et le point aval.

• Suivi bassin versant « témoin »



Les principales informations mises en évidence par ce suivi sont les suivantes :

- ① – Le site aval (courbe bleue) présente des à-coups d'eau plus importants qu'en amont (courbe verte) avec des débits spécifiques élevés. Cette situation s'explique probablement par le manque de fiabilité de la mesure en situation de hautes eaux (voir photographie page 10). Pour les autres gammes de débits, les valeurs entre les deux points de suivi sont plutôt proches.
- ② – Lors de l'été 2024 des valeurs inférieures à 0,2 l/s/km² sont constatées. Lors de l'été de 2023, l'assèchement du cours d'eau est total que ce soit en amont ou en aval.

• Périodes d'étiage

Si l'on compare les deux bassins versants au niveau de leur point de fermeture (voir Illustration 51), on constate que

- ① – le bassin versant « plan d'eau » (courbe orange) présente, lors de l'étiage extrême de 2023, encore un léger écoulement contrairement au bassin versant « témoin » (courbe bleue). Cette situation suggère un phénomène de restitution, extrêmement faible, de la part des plans d'eau sur l'hydrologie. Cette restitution bien que très faible pendant cette période, est notable puisqu'elle a évité l'assèchement complet pendant l'étiage sévère de 2023 (voir photographies ci-après). On précisera également que les débits en jeu ne sont pas de nature à être compatible avec la vie piscicole.

Tableau 5 : Ecoulement en situation d'étiage sévère (été 2023)



Etiage 2023 – Situation début septembre	
<p>LAP_PE_AV</p> <p>Faible écoulement</p> 	<p>LAP_TE_AV</p> <p>Absence d'écoulement</p> 

Illustration 51 : Comparaison des réponses hydrologiques des deux bassins versants étudiés avec zoom en étiage



- ② – Pour ce qui concerne l'étiage 2024, le suivi ne met pas en évidence d'écart notable entre le bassin versant « témoin » (courbe bleue) et le bassin versant « plan d'eau » (courbe orange). Les débits spécifiques descendent sur les 0,2 l/s/km² pour atteindre des valeurs proches de 0,03 à 0,05 l/s/km² à la fin du mois d'août.

6.5.3 Présentation des résultats - Site de Gouttières

Pour rappel, la dénomination des stations de suivi est la suivante :

- Bassin versant « Plan d'eau – Amont » : GOUT_PE_AM – bassin versant de 95 ha ;
- Bassin versant « Plan d'eau – Aval » : GOUT_PE_AV – bassin versant de 310 ha ;
- Bassin versant « Témoin – Amont » : GOUT_TE_AM – bassin versant de 96 ha ;
- Bassin versant « Témoin – Aval » : GOUT_TE_AV – bassin versant de 197 ha.

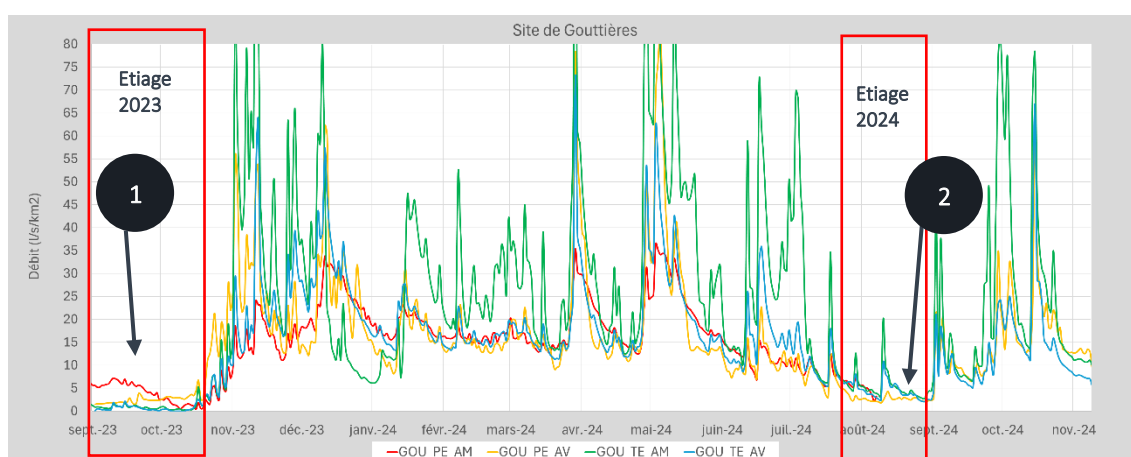
Sur le site de Gouttières, les débits spécifiques sont globalement équivalents entre les deux bassins versants. Aucun assec n'a été observé, pendant la période de suivi quel que soit le bassin versant (« plan d'eau » ou « témoin » (voir premier graphique de l'illustration 52)

Il est important de noter que les débits spécifiques de GOU_TE_AM (courbe verte) peuvent parfois atteindre des valeurs très élevées, ce qui pourrait être attribué à une surestimation liée à la précision de la courbe de tarage. Cette précision est probablement affectée par des phénomènes de contractions latérales en hautes eaux liées à la pose du seuil au départ d'une section busée (voir Illustration 14).

Remarque : Les débits enregistrés sur la fin du suivi au niveau de GOUT_PE_AM n'ont pas été pris en compte en raison de problème de dégradation du seuil et d'atterrissements occasionnant des débordements latéraux, réduisant fortement la hauteur de déversement au niveau du seuil.

Illustration 52 : Débits spécifiques sur le site de Gouttières

• Ensemble des mesures

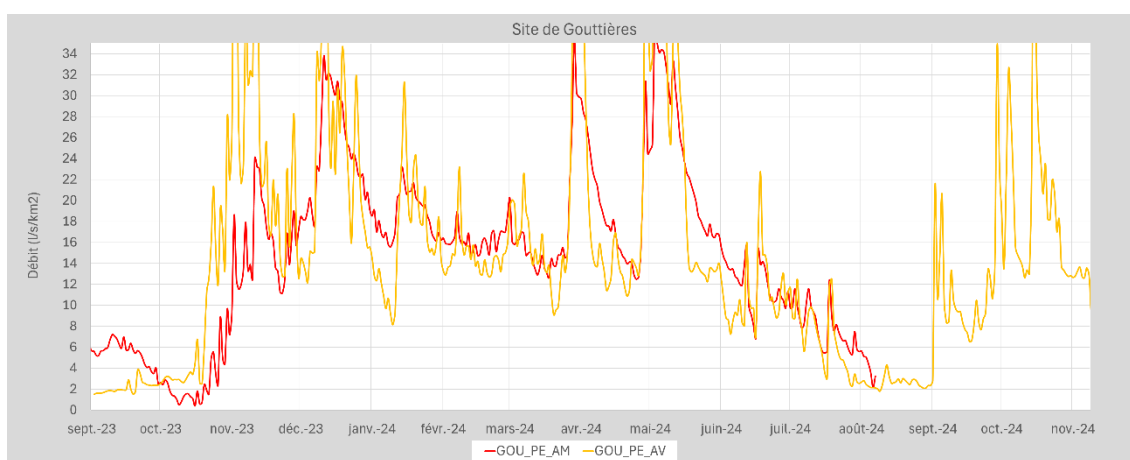


Remarque : Compte tenu des incertitudes sur les débits en hautes eaux, les graphiques présentés ci-après présentent une ordonnée maximale limitée à 35 l/s/km² (en lien avec les éléments présentés dans le Tableau 4).

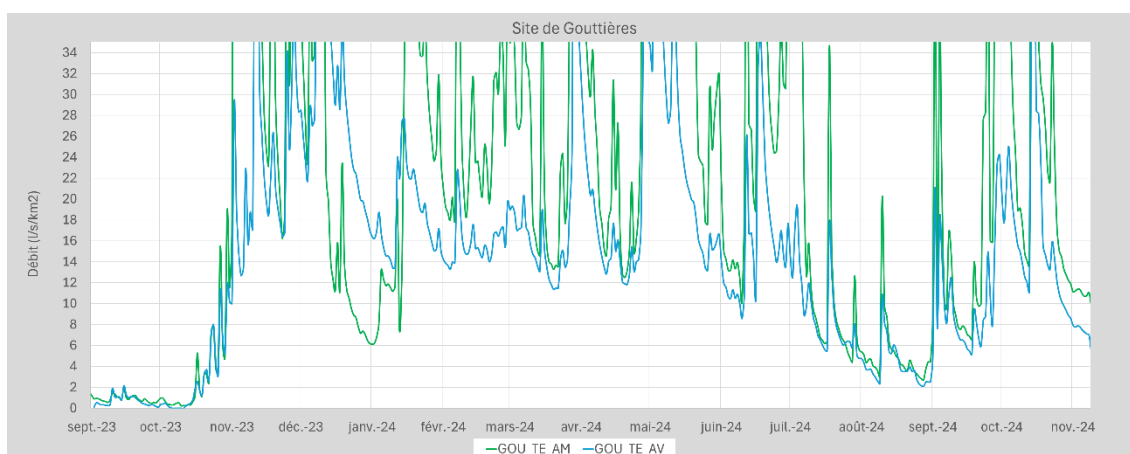
Les principales informations mises en évidence par ce suivi sont les suivantes :

- ① – Sur l'été 2023, le suivi met en évidence des débits en amont du plan d'eau (courbe rouge) qui baissent progressivement pour atteindre des valeurs similaires à ceux constatés sur le bassin versant « témoin » (courbe orange). Par contre, ceux en aval des plans d'eau se maintiennent à un niveau relativement stable assurant un excédent d'écoulement pendant toute cette période critique.
- ② – Au cours de l'été 2024, l'hydrologie en aval des plans d'eau reste identique à celle du bassin versant « témoin ».

• Suivi « plan d'eau »

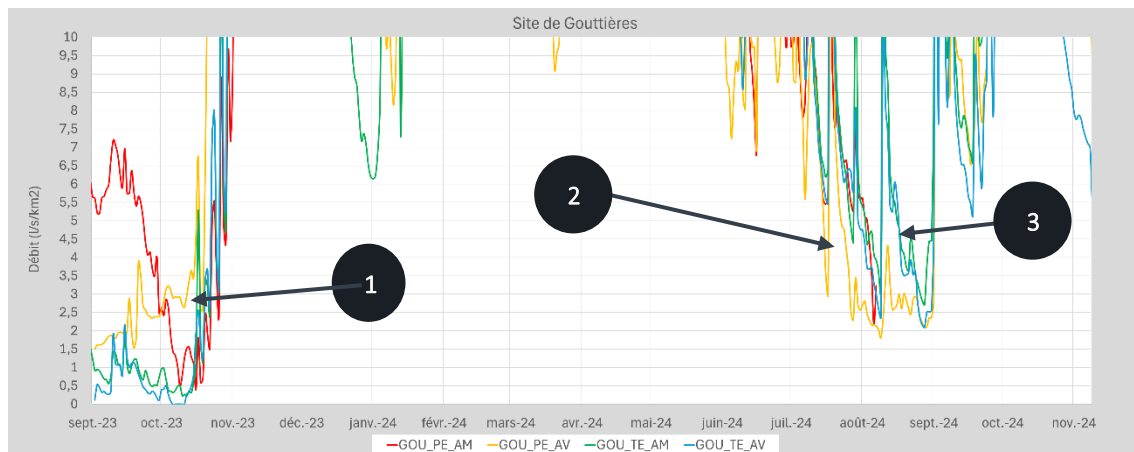


• Suivi « témoin »



Les débits enregistrés en amont et à la fermeture du bassin versant « témoin » sont similaires lors des deux périodes d'été.

- **Périodes d'été**



Le suivi met en évidence des ordres de grandeur similaires entre les deux sites de suivi, notamment sur les périodes d'été, avec une situation très contrastée entre l'été 2023 (0,2 à 0,4 l/s/km²) et celui de 2024 (2,5 à 3,5 l/s/km²).

Quelques phénomènes apparaissent cependant :

- ① – Lors d'été extrême (situation de 2023), c'est en aval des plans d'eau que les débits spécifiques sont les plus importantes ;
- ② – Lors d'un été plus normal (situation de 2024) les débits spécifiques sont relativement proches avec des valeurs avoisinant les 2,5 l/s/km². On constate toutefois que les débits en aval des plans d'eau (courbe orange) sont toujours légèrement plus faibles que les autres ;
- ③ – Les effets des précipitations de la mi-août sont en partie lissés par les plans d'eau (écart entre la courbe orange et les courbes bleue et verte). Cette situation peut traduire l'effet tampon lié aux pertes par évaporation qu'il faut compenser et/ou l'effet de laminage des débits dans les plans d'eau dans la restitution aval).

6.5.4 Synthèse

L'instrumentation permettant d'évaluer l'incidence hydrologique des plans d'eau sur deux secteurs du bassin versant de la Sioule a été opérationnelle pendant deux situations d'étiage très contrastées :

- été 2023 : situation d'étiage exceptionnelle. Pour cette période, seule la fin du phénomène fait l'objet d'une métrologie.
- Eté 2024 : situation d'étiage peu marquée, s'étalant sur une courte période.

Les deux sites instrumentés (Lapeyrouse et Gouttières) présentent des réponses hydrologiques différentes en période de basses eaux (voir tableau ci-après). En effet, le secteur de Lapeyrouse apparaît beaucoup plus séchant que celui de Gouttières.

La présence de formations géologiques avec une dominance des formations métamorphiques contrairement au secteur de Gouttières peut être à l'origine de cette situation.

Tableau 6 : Débits spécifiques en étiage

	Secteur Lapeyrouse	Secteur Gouttières
Etiage 2023	0 à 0,1 l/s/km ²	0,2 à 2 l/s/km ²
Etiage 2024	0,05 à 0,2 l/s/km ²	2 à 4 l/s/km ²

Sur la base des mesures et enregistrements, on ne constate pas de déficit d'écoulement marqué sur les secteurs avec plans d'eau. En période d'étiage sévère, on observe même, sur les deux sites instrumentés, un excédent d'écoulement par rapport aux bassins versants témoins, qui provient :

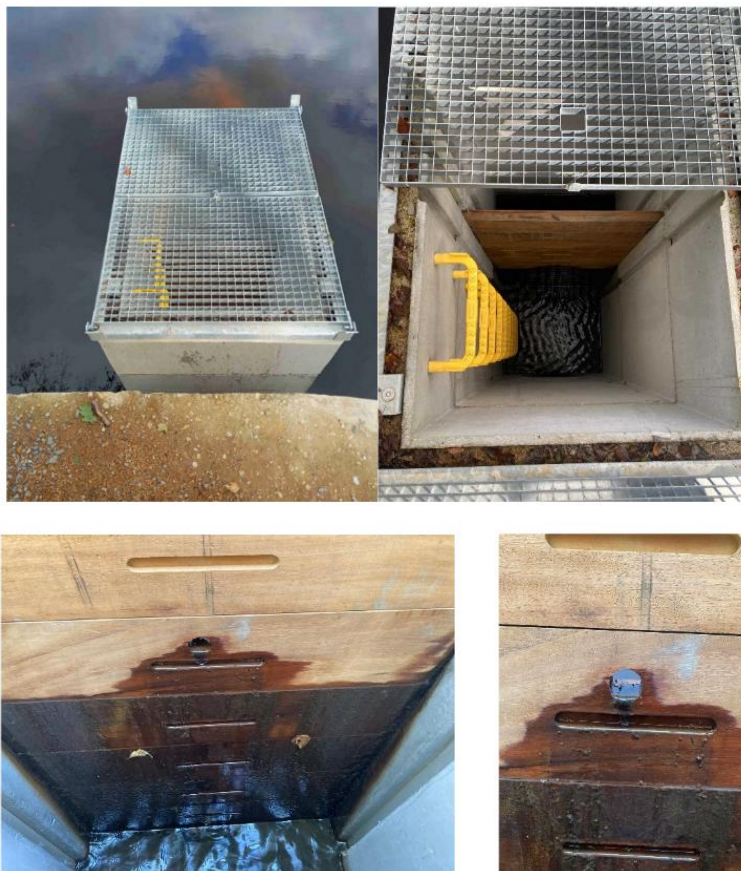
- Des fuites en pied de digue,
- Du réseau de drainage des digues lorsqu'il en existe,
- Des apports liés aux éventuels débits réservés, notamment lorsque les plans d'eau sont équipés de moine avec un ajutage installé à mi-hauteur,
- Des fuites pouvant être constatées sur les organes de vidange.

Pour les plans d'eau équipés de moine disposant d'un ajutage à mi-hauteur pour assurer le débit « réservé », il peut arriver, en situation d'étiage très marqué, lorsque que débit entrant dans le plan d'eau est inférieur au débit réservé (habituellement calé au 1/10 du module), qu'ils assurent une forme de soutien d'étiage temporaire ($Q_{\text{sortant}} > Q_{\text{entrant}}$) en aval immédiat.

Cette restitution se traduit par un abaissement du niveau du plan d'eau (marnage), accentué par les phénomènes d'évaporation.

L'impact hydrologique bénéfique du plan d'eau n'est que temporaire dans la mesure où le retour de conditions pluvieuses augmentant le débit entrant dans le plan d'eau ne se traduit pas directement par une augmentation des débits restitués en aval. Cette situation n'intervient qu'après remplissage total de la retenue et activation de sa surverse sommitale dans le moine (effet du marnage à compenser).

Illustration 53 : Exemple de moine avec ajustage de débit réservé



Source OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITE, DIRECTION REGIONALE BRETAGNE LE BIHAN M., HUBERT A., ANQUETIL H.
Fiche n°3

Ce phénomène est particulièrement visible sur le site de Lapeyrouse lors de l'étiage 2023. Il ne l'est pas lors de l'été 2024.

Les conditions climatiques particulières de l'année 2024 (année très humide faisant suite à plusieurs années sèches) n'ont pas permis de mettre en évidence une incidence marquée des plans d'eau sur l'hydrologie estivale.

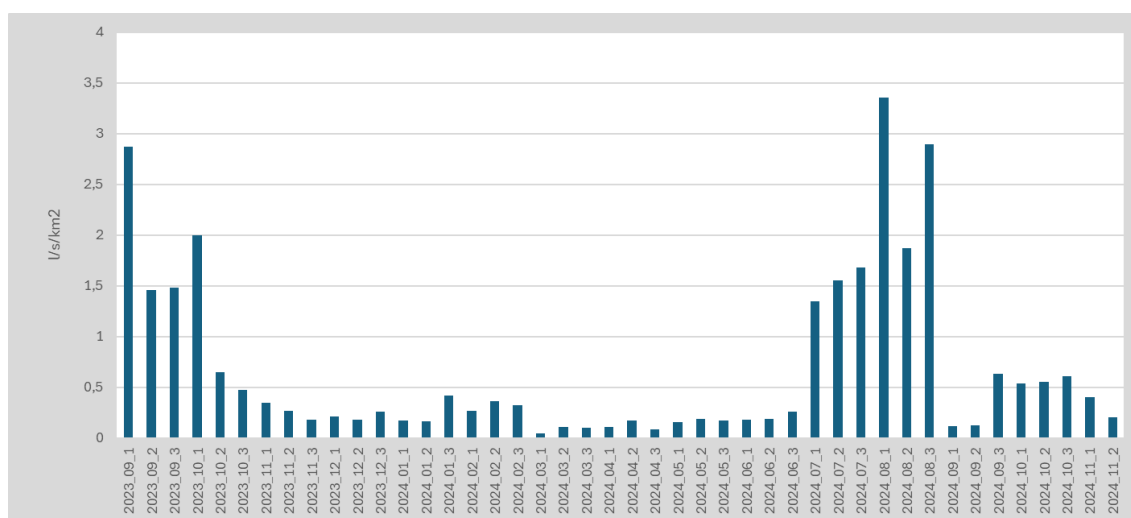
Sur ces bases, Il apparait difficile de définir une règle simple et systématique de l'impact des plans d'eau sur l'hydrologie.

• Discussion :

On constate que le déficit d'écoulement potentiellement provoqué par les phénomènes d'évaporation ne se retranscrit pas dans l'hydrologie générale.

Prenons par exemple le cas du site de Lapeyrouse, le bassin versant « plan d'eau » présente une surface en eau évaluée à 18,25 ha pour une superficie total de 449 ha. Sur la base des conclusions du bilan hydroclimatique (voir Illustration 48), le déficit d'écoulement, par rapport à une prairie agricole, devrait atteindre en plein été des valeurs comprises entre 1,5 et 3,5 l/s/km² par rapport au bassin versant « témoin » lors de certaines décades.

Illustration 54 : Déficit d'écoulement potentiel en lien avec l'évaporation sur le bassin versant « plan d'eau » sur la base d'un bilan hydroclimatique – Secteur Lapeyrouse



Dans les faits le suivi hydrologique sur les deux typologies de bassin versant ne met pas en évidence une telle situation (voir Illustration 51). Cela laisse sous-entendre que l'eau évaporée est compensée par l'ensemble des restitutions pouvant être liées aux équipements en place (fuite pied de digue, drainage digue, moines, fuite sur vidange,...).

Par contre, le suivi met en évidence les effets du marnage des plans d'eau et les conséquences vis-à-vis de la restitution des écoulements vers l'aval lors de retour à des conditions climatiques plus favorables au cours d'eau.

Sur le site de Lapeyrouse, en 2023, il a ainsi fallu 2 à 3 semaines avant le retour à la transparence hydraulique des plans d'eau en période automnale.

Sur le site de Gouttières, ce phénomène est peu marqué dans la mesure où les surfaces de plan d'eau sont proportionnellement 5 à 6 fois plus faibles que sur le site de Lapeyrouse (les plus fortes décades présenteraient des valeurs maximales de 0,3 à 0,5 l/s/km² seulement).

L'impact des phénomènes d'évaporation sur plans d'eau sur l'hydrologie estivale des cours d'eau est potentiellement visible sur les bassins versants où la densité des plans d'eau est très importante.

Sur les densités faibles (cas par exemple du site de Gouttières avec 0.7% du territoire en plan d'eau) aucune incidence significative n'est mise en évidence lors des été 2023 et 2024.

Sur les densités fortes (cas par exemple du site de Lapeyrouse avec 4,5 % du territoire en plan d'eau) cet impact apparaît compensé par les dispositions techniques particulières habituellement mises en œuvre sur les plans d'eau de taille significative (drainage digue, moine avec ajutage intermédiaire, ...).

Les caractéristiques des ouvrages et leur importance (surface et proportion par rapport à la taille du bassin versant amont) semblent constituer le critère principal qui conditionne l'incidence sur l'hydrologie estivale, qu'elle soit négative ou positive.

6.6 « Qualité des eaux » - données collectées et interprétation

Deux types de suivi ont été mis en œuvre :

- Un suivi en continu sur les paramètres « oxygène dissous » et température ;
- Un suivi ponctuel avec analyses de plusieurs paramètres physico-chimiques en laboratoire. Les paramètres analysés fixés par le CCTP étaient les suivants : acidité, ammonium (NH_4), azote global, azote Kjeldahl (NTK), matières en suspension, nitrates (NO_3), nitrites (NO_2), orthophosphates (PO_4), phosphore total (Pt), turbidité.

Le suivi en continu a été mis en place dès l'installation du réseau de suivi. Pour ce qui concerne les prélèvements, ceux-ci n'ont été mis en œuvre qu'à partir de 2024, entre février et octobre.

Par rapport au suivi hydrologique, un point de suivi supplémentaire a été positionné à l'aval immédiat d'un plan d'eau (LAP_PE_INTER et GOUT_PE_INTER), voir Illustration 13)

Concernant l'interprétation des données, les résultats des mesures :

- Sont comparés entre eux (à l'échelle des sous bassins versants « plans d'eau » et « Témoin » pour mettre en évidence une éventuelle incidence des plans d'eau ;
- Sont analysés selon le référentiel permettant d'évaluer la qualité des milieux aquatiques fixé par l'arrêté ministériel du 25 janvier 2010 modifié le 9 octobre 2023².

Selon la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), les éléments physico-chimiques généraux interviennent essentiellement comme facteurs explicatifs des conditions biologiques. Les paramètres retenus par l'arrêté ministériel sont en lien avec le bilan oxygène (O_2 dissous, DBO, COD), la température, le bilan nutriments (PO_4 , Pt, NH_4 , NO_2 , NO_3), l'acidité. Pour ces paramètres, cinq classes d'état sont définies (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais), avec des concentrations seuils pour chacun des paramètres retenus.

On peut signaler que les valeurs seuils retenues reprennent celles de l'ancien outil d'évaluation de la qualité des eaux superficielles, à savoir le SEQ-EAU « aptitude à la biologie ». Parmi les paramètres physico-chimiques non retenus par l'arrêté ministériel (exemple MES et NTK) il est possible pour apprécier la qualité du cours d'eau d'utiliser la grille du SEQ-EAU.

6.6.1 Site de Lapeyrouse

6.6.1.1 Oxygène dissous – Suivi en continu

Le suivi des concentrations en oxygène dissous révèle des dynamiques contrastées entre les différents points de mesures. En amont du plan d'eau (LAP_PE_AM), les concentrations restent relativement élevées et stables, oscillant principalement entre 7 et 10 mg/L. À l'inverse, les concentrations mesurées à l'aval du plan d'eau (LAP_PE_INTER et LAP_PE_AV) montrent des valeurs parfois très basses, particulièrement pendant la période estivale, avec des concentrations pouvant descendre sous les 3 mg/l (état mauvais d'après le référentiel ministériel). **Ces faibles valeurs reflètent un appauvrissement en oxygène en aval des plans d'eau en période estivale** (faible oxygénation des eaux de drainage ou de celle du plan d'eau en lien avec les phénomènes d'eutrophisation ou de niveaux de prise d'eau (vidange basale ou à mi-hauteur)).

Note : les valeurs passant brusquement à 0 sont toujours liées à des problèmes d'ensablement ou de dépôts sur le capteur optique empêchant la mesure.

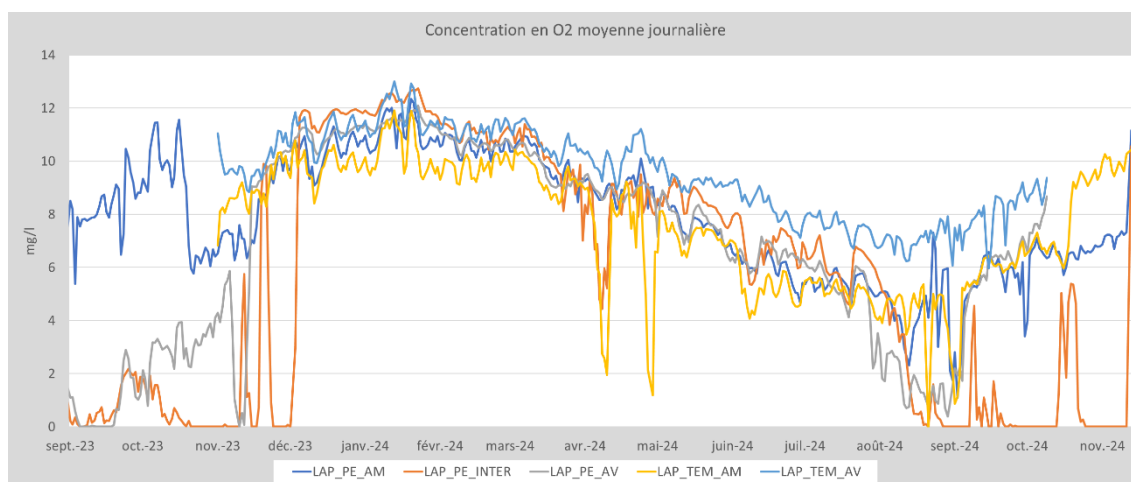
² Arrêté du 9 octobre 2023 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement

Sur le cours d'eau témoin (LAP_TE), les concentrations en oxygène sont globalement plus élevées tout au long de la période de suivi, avec une simple évolution saisonnière liée au réchauffement des eaux, indiquant une situation moins impactée qu'en aval des plans d'eau.

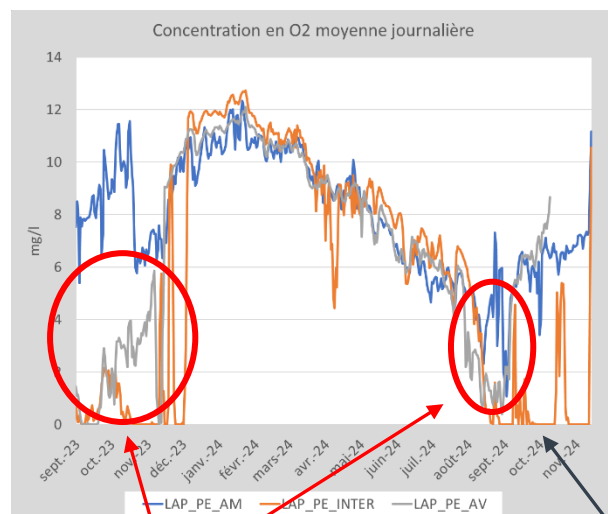
De manière générale, une forte saisonnalité est observée sur l'ensemble des points de mesure. Les concentrations en oxygène dissous sont plus basses en été, en raison des températures de l'eau et/ou de l'intensité de la production biologique dans le plan d'eau, et plus élevées en hiver, du fait de températures plus basses et d'un effet plus limité des plans d'eau.

Ces résultats mettent en évidence l'impact significatif et défavorable du plan d'eau sur la concentration en oxygène dissous dans les eaux en aval, particulièrement pendant les périodes estivales.

Illustration 55 : Concentration en oxygène dissous - site de Lapeyrouse

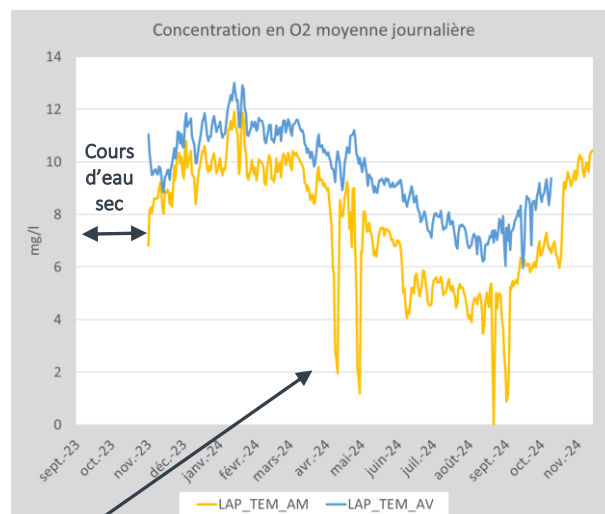


Bassin versant « Plan d'eau »



Sous oxygénation
estivale

Bassin versant « témoin »



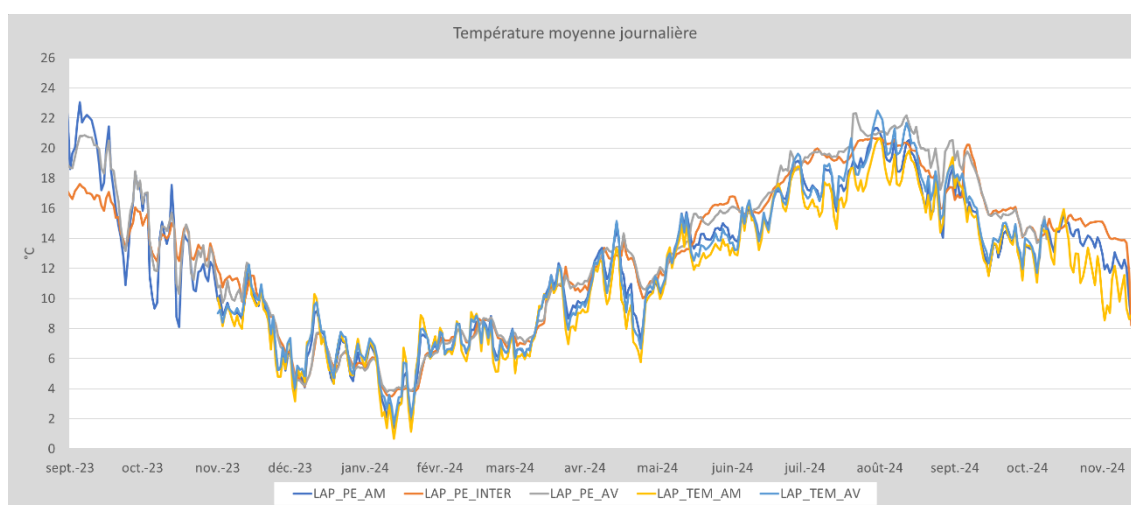
Dépôt sur
capteur

6.6.1.2 Température – Suivi en continu

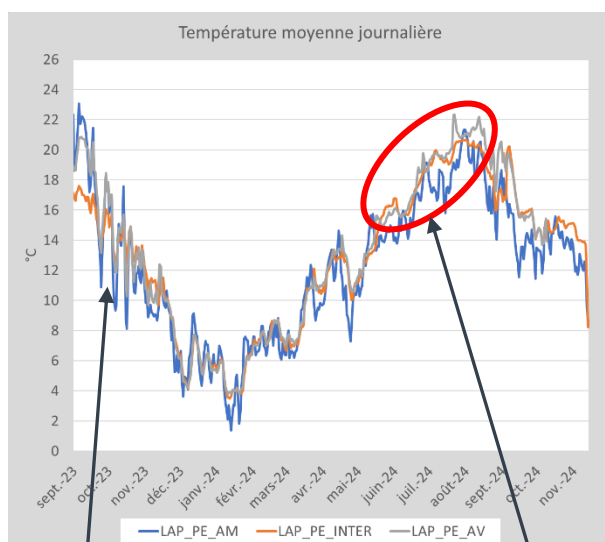
Le suivi des températures ne met pas en évidence d'écart significatif entre les points de suivi. On distingue toutefois :

- des eaux légèrement plus fraîches en aval des plans d'eau lors de la canicule de 2023 (situation en lien avec le mode de vidange (moine) et des fuites en pied digue).
- au printemps 2024, les eaux en aval du plan d'eau sont toujours légèrement plus chaudes qu'en amont et que sur le bassin versant « témoin ». Les écarts restent cependant modestes (1 à 2 °C) et peuvent s'expliquer par le réchauffement de la masse d'eau superficielle du plan d'eau à cette saison (printemps ?) et les modalités d'évacuation par surverse active à cette période.

Illustration 56 : Température - site de Lapeyrouse



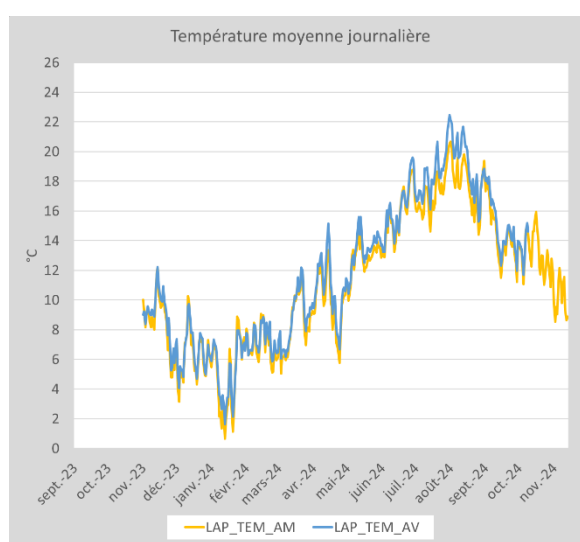
Bassin versant « Plan d'eau »



(bleu) Forte sensibilité à la température de l'air (sonde partiellement immergée ?)

(gris et orange) Aval plan d'eau plus chaud

Bassin versant « témoin »



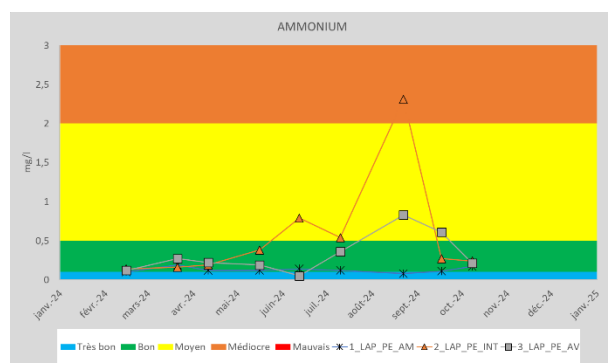
6.6.1.3 Ammonium

Le suivi des concentrations en ammonium montre une qualité de l'eau allant de "très bonne" à "bonne" sur l'ensemble des points jusqu'à l'été 2024. À partir de juin 2024, une augmentation notable est observée sur le point LAP_TE_INT, qui passe en classe "moyenne" avant d'atteindre la classe "médiocre" en août. De manière similaire, le point de fermeture du bassin versant « plan d'eau » (LAP_PE_AV) suit cette tendance, avec une dégradation en classe "moyenne" durant les mois d'août et septembre 2024.

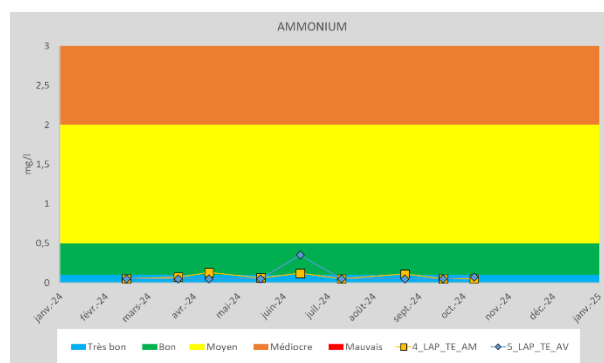
En revanche, les points « amont plan d'eau » ainsi que les points « témoins - amont et aval » maintiennent une qualité de l'eau "bonne" à "très bonne" tout au long de cette période.

Ces résultats mettent en évidence l'incidence des plans d'eau sur les concentrations en ammonium, particulièrement durant la période estivale, où l'effet semble amplifier les augmentations locales de concentration compte tenu de la faible oxygénation des écoulements (formes azotées présentes sous forme réduite (NH_4) et non oxydée (NO_3)).

Illustration 57 : Concentration en ammonium - site de Lapeyrouse



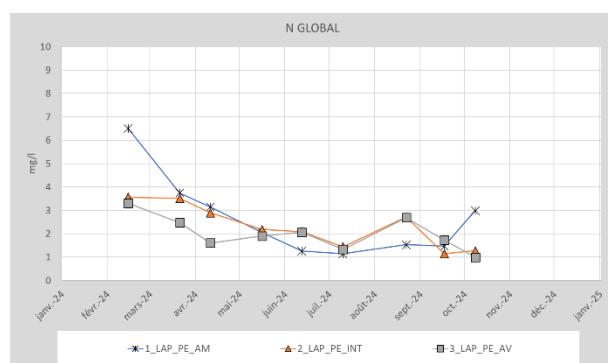
Bassin versant « Plan d'eau »



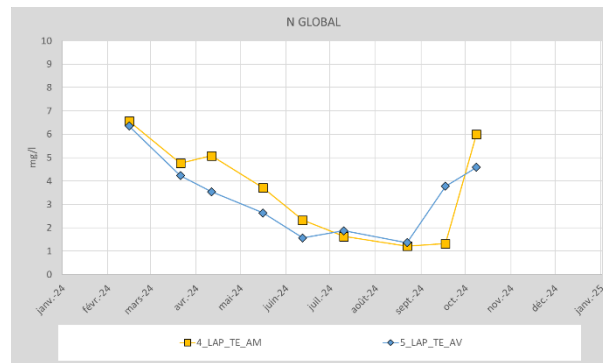
Bassin versant « témoin »

En effet l'évolution de l'azote global qui intègre toutes les formes d'azotes ne présente quant à lui pas de pic estival. C'est d'ailleurs en période hivernale que les plus fortes concentrations en azote sont mesurées dans les cours d'eau (secteur plan d'eau et secteur témoin).

Illustration 58 : Concentration en azote global - site de Lapeyrouse



Bassin versant « Plan d'eau »



Bassin versant « témoin »

6.6.1.4 Nitrates

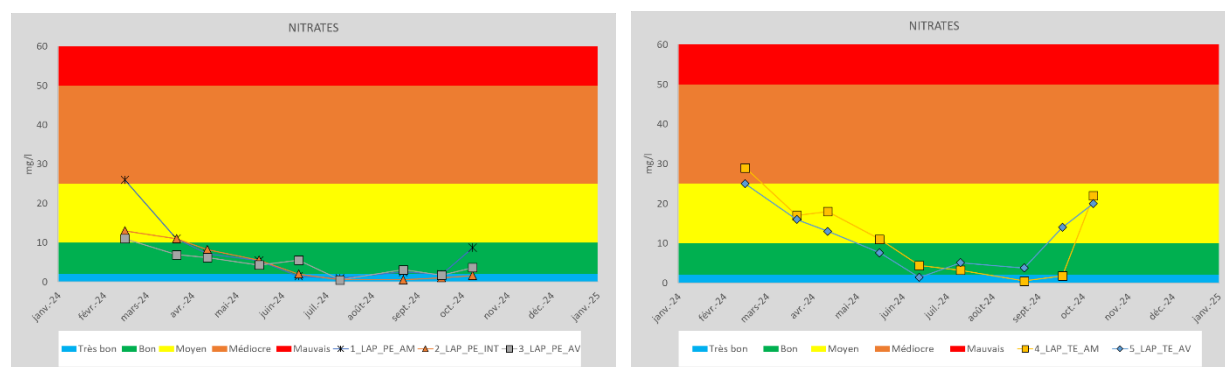
La concentration en nitrates suit une tendance générale de diminution au fil des campagnes de suivi. Cette concentration, particulièrement élevée en janvier, est due aux phénomènes de lessivage des sols en contexte agricole, notamment pour le cours d'eau témoin et en amont des plans d'eau, tandis qu'elle est moins marquée pour les points situés en aval du plan d'eau et à l'intermédiaire.

Pendant la période estivale, une baisse notable des concentrations est observée sur l'ensemble des points de mesure, ce qui reflète probablement une diminution des apports en nitrates et/ou une intensification des processus biologiques d'assimilation par les organismes aquatiques.

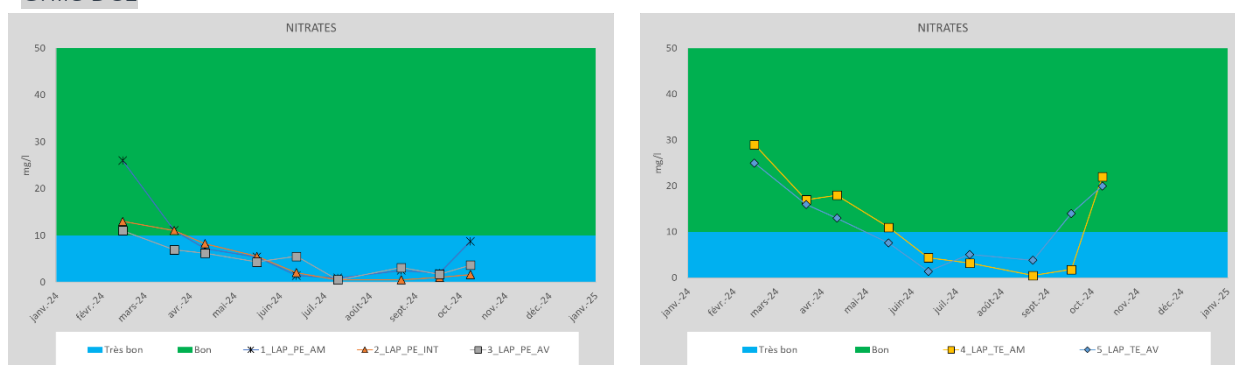
On précisera que pour les stations en aval des plans d'eau (PE_INTER et PE_AV), la faible concentration en oxygène dissous en période estivale n'autorise pas la présence de cet élément dans les écoulements (voir commentaire ammonium). La charge azotée est majoritairement voire exclusivement sous la forme réduite

Illustration 59 : Concentration en nitrates - site de Lapeyrouse

Grille SEQ-EAU



Grille DCE



Bassin versant « Plan d'eau »

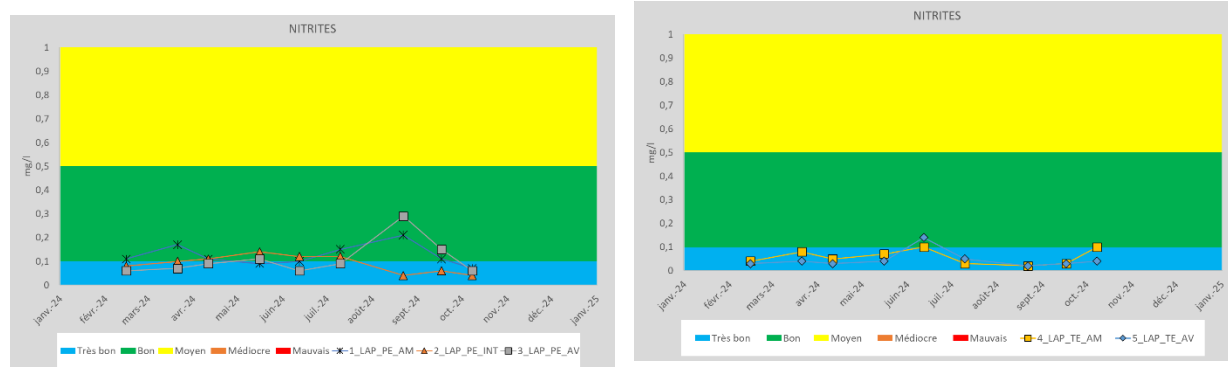
Bassin versant « témoin »

6.6.1.5 Nitrites

La concentration en nitrites reste globalement stable tout au long des campagnes de suivi, sans variations significatives entre les différents points de mesure. Seule une légère augmentation est observée en août pour les points situés en amont (LAP_PE_AM) et en aval (LAP_PE_AV) des plans d'eau. Cette situation est principalement liée à la prédominance des formes réduites des composés azotés dans les écoulements en aval des plans d'eau (voir commentaire ammonium).

En raison de la faible oxygénation des eaux, l'azote présent dans les écoulements passe de la forme NO_3 puis NO_2 puis NH_4 .

Illustration 60 : Concentration en nitrites - site de Lapeyrouse



Bassin versant « Plan d'eau »

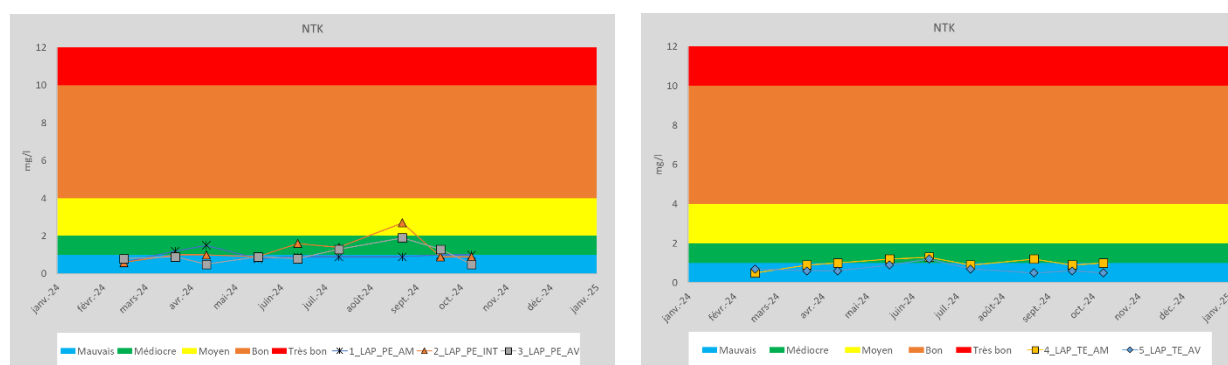
Bassin versant « témoin »

6.6.1.6 Azote Kjeldahl (NTK)

Les évolutions en azote Kjeldahl sont fortement liées à celles de l'ammonium³

Elles ne mettent pas en évidence de composés azotés sous forme organiques dans la mesure où ces deux concentrations (NTK et NH_4) sont très proches.

Illustration 61 : Concentration en azote Khejdhal (NTK) – Site de Lapeyrouse



Bassin versant « Plan d'eau »

Bassin versant « témoin »

³ Par définition l'azote NTK constitue le cumul de l'azote sous forme réduite (NH_4) auquel s'ajoute l'azote intégrée dans les substances organiques. Sont exclus de ce calcul, l'azote sous forme oxydée (nitrates et nitrites).

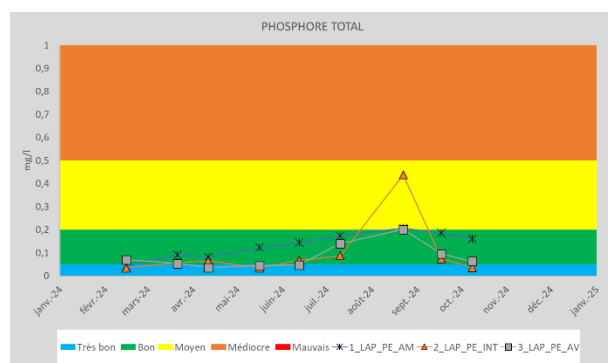
6.6.1.7 Phosphore

Les concentrations en phosphore total restent globalement faibles et placent le cours d'eau entre « Très bon » et « Bon » de janvier à juillet 2024 pour l'ensemble des points de suivi.

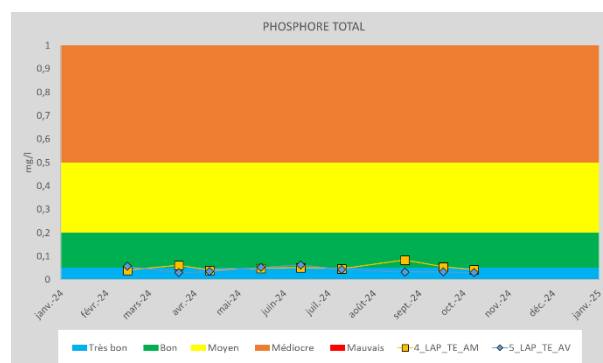
Une concentration élevée est cependant observée en août 2024, sur le bassin versant « plan d'eau » pour les deux stations situées en aval de plans d'eau (LAP_PE_INT et LAP_PE_AV). Les concentrations placent le cours d'eau dans un état « Moyen » voire « Médiocre ». Pendant cette période, le point « plan d'eau – amont (LAP_PE_AM) » ainsi que les points situés sur le bassin versant témoin (LAP_TE_AM et LAP_TE_AV) conservent des concentrations faibles.

On notera que cette situation ne perdure pas en septembre avec des cours d'eau revenant aux classes de qualité initiales. Ce suivi semble mettre en évidence un impact des plans d'eau, en période estivale, sur les niveaux de phosphore total. Le suivi sur d'autres paramètres peut renseigner sous quelle forme se trouve ce phosphore (orthophosphates ou phosphore organique).

Illustration 62 : Concentration en phosphore total - site de Lapeyrouse



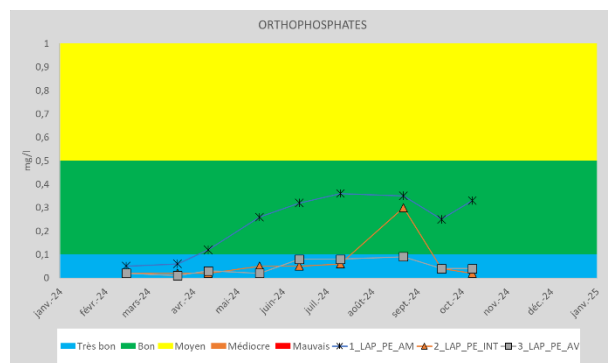
Bassin versant « Plan d'eau »



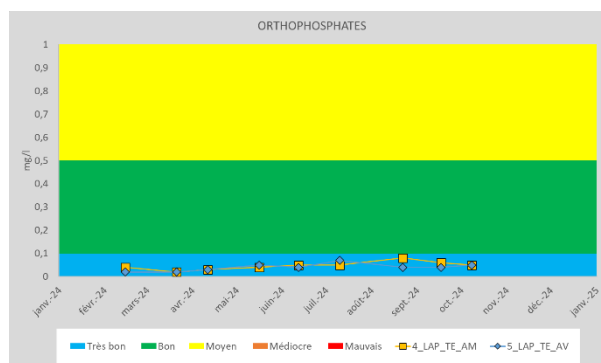
Bassin versant « témoin »

Les concentrations en orthophosphates restent globalement bonnes, voire très bonnes, malgré une augmentation progressive au niveau de LAP_PE_AM tout au long du suivi, ainsi qu'une augmentation ponctuelle observée sur LAP_PE_INT, qui présente une évolution similaire à celle du phosphore total.

Illustration 63 : Concentration en orthophosphates - site de Lapeyrouse



Bassin versant « Plan d'eau »



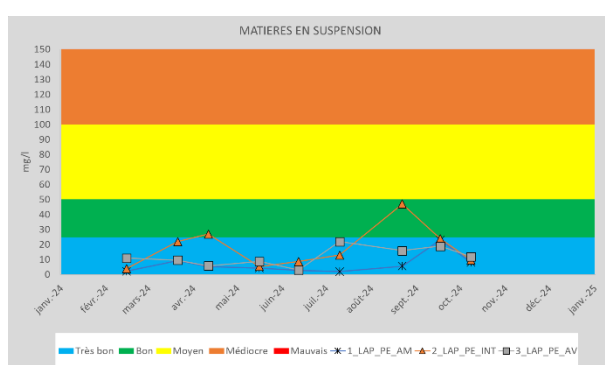
Bassin versant « témoin »

On notera, sur la base des masses molaires, que la concentration en orthophosphates mesurée en aout 2024 dans au niveau de LA_PE_INT ne suffit pas à expliquer la concentration en phosphore total mesurée. Une origine organique liée aux développements algaux en suspension dans la colonne d'eau des plans d'eau peut être suspectée (origine potentiellement confirmée par la concentration en MES)

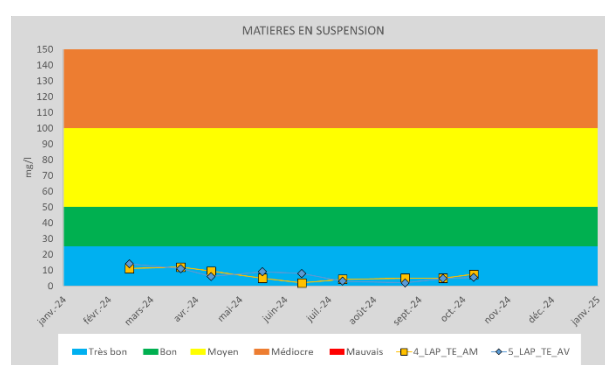
6.6.1.8 Matière en suspension

La concentration en matières en suspension est globalement très bonne pour toutes les campagnes et sur l'ensemble des points de suivi. On observe ponctuellement des augmentations, notamment au niveau de LAP_PE_INT, où la concentration atteint la classe "bonne".

Illustration 64 : Concentration en matières en suspension lors des campagnes de prélèvements - site de Lapeyrouse



Bassin versant « Plan d'eau »

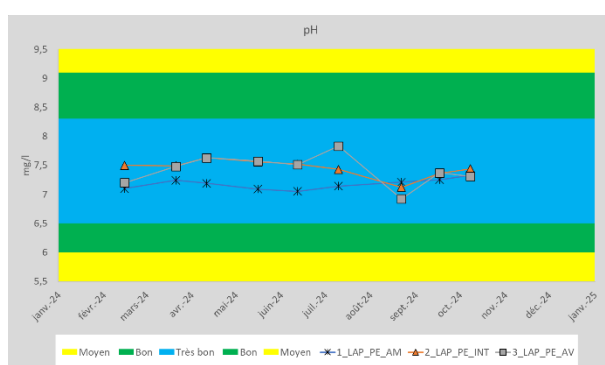


Bassin versant « témoin »

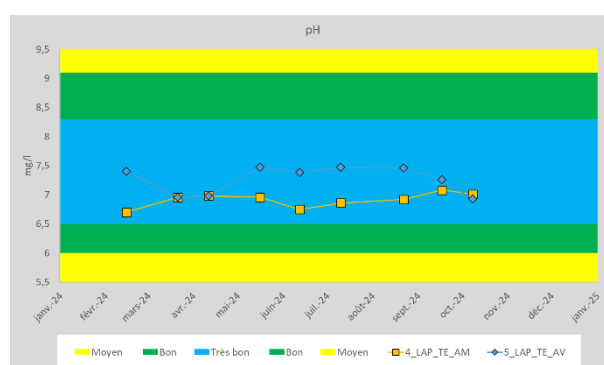
6.6.1.9 Acidité -pH

Le suivi ne met pas en évidence de pH pouvant remettre en cause les usages et les fonctionnalités du milieu aquatique. Les pH mesurés restent compris entre 7 et 8 tout au long de l'année.

Illustration 65 : pH - Site de Lapeyrouse



Bassin versant « Plan d'eau »



Bassin versant « témoin »

6.6.1.10 Synthèse – Secteur Lapeyrouse

La qualité globale des deux bassins versants est globalement bonne pour les paramètres mesurés.

Un impact « plan d'eau » est observé sur l'ammonium, particulièrement durant la période estivale compte tenu de la faible oxygénation des écoulements.

Des déclassements ponctuels sur le paramètre phosphore total peuvent être également constatés en aval des plans d'eau. Ces déclassements peuvent être en lien avec le développement algal dans la colonne d'eau et son effet en aval.

Sur les deux bassins versants, les concentrations en nitrates peuvent être significatives en dehors de l'été (concentrations comprises entre 10 à 30 mg/l), ce qui pourrait s'expliquer par le lessivage hivernal des sols dans un contexte majoritairement agricole.

6.6.2 Site de Gouttières

6.6.2.1 Oxygène dissous – Suivi en continu

Les concentrations en oxygène dissous en amont des plans d'eau (GOUT_PE_AM) sont relativement élevées et stables, oscillant entre 7 et 10 mg/L, tout comme le point témoin (GOUT_TEM_AM).

Sur ce site, les concentrations en aval des plans d'eau restent élevées tout au long de l'année. Cette situation est en lien avec les modalités d'évacuation vers l'aval qui se font par surverse, contrairement au site de Lapeyrouse où la vidange estivale concerne des eaux profondes (fuites, moine et drainage digue).

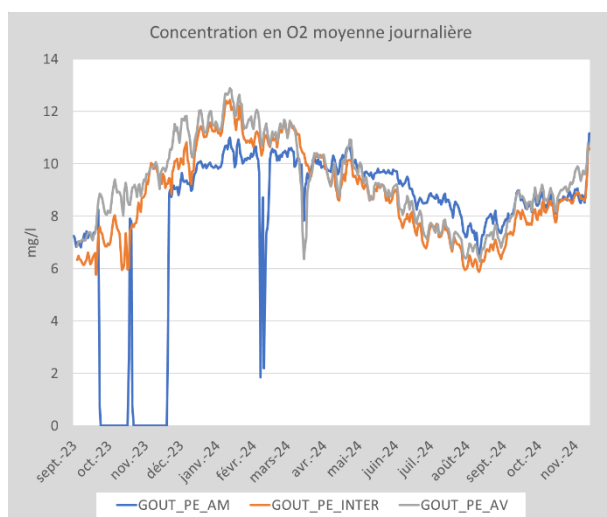
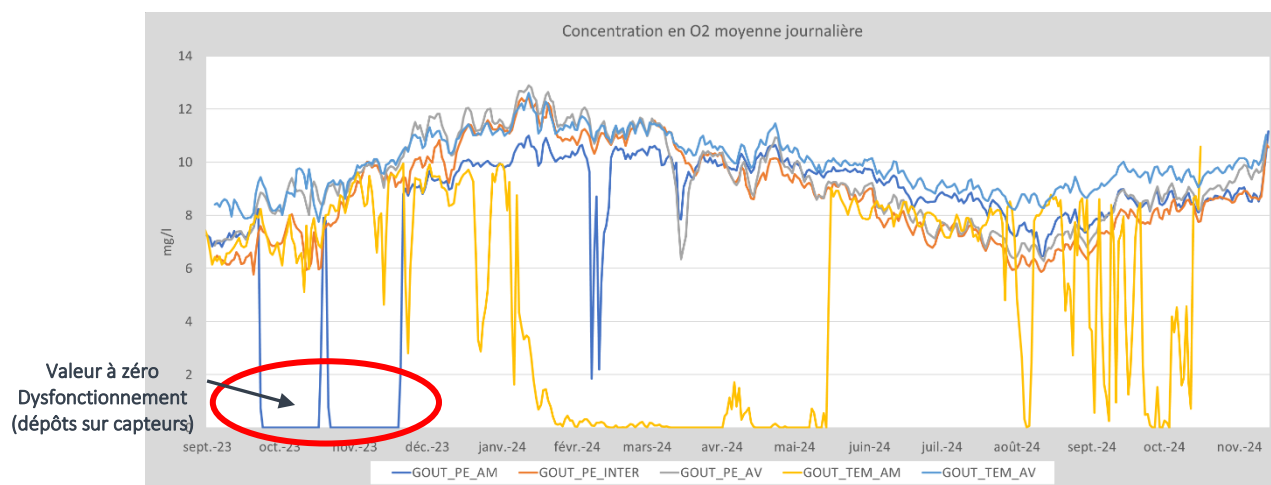
On notera que les concentrations constatées en amont et en aval des plans d'eau sont également dépendantes des évolutions de la température de la surface en eau. En hiver, le plan d'eau permet un refroidissement des eaux, assurant ainsi une meilleure oxygénation, en période estivale avec le réchauffement, c'est le phénomène inverse qui se produit.

À noter que les chutes drastiques (valeurs passant à zéro) à certaines périodes correspondent à des données non mesurées (ensablement, dépôts sur le capteur optique). Les problèmes récurrents constatés sur la sonde TEM_AM ont d'ailleurs conduit à son changement en cours de suivi de manière à fiabiliser la mesure pendant l'été 2024.

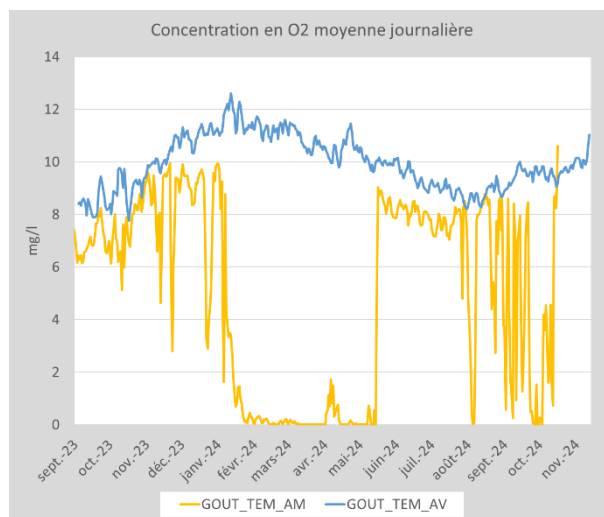
Une forte saisonnalité est observée, avec des concentrations plus faibles en été, associées à une température élevée et une diminution de l'oxygénation naturelle des eaux, et des concentrations plus élevées en hiver.

Le suivi réalisé sur le site de Gouttières montre l'impact des plans d'eau sur les concentrations en oxygène dissous, avec des valeurs plus faibles en aval lors de la période estivale. L'impact sur ce site en aval des plans d'eau reste toutefois limité et sans incidence notable sur les fonctionnalités biologiques du cours d'eau (concentrations se maintenant au-dessus de 6 mg/l).

Illustration 66 : Concentration en oxygène dissous - site de Gouttières



Bassin versant « Plan d'eau »

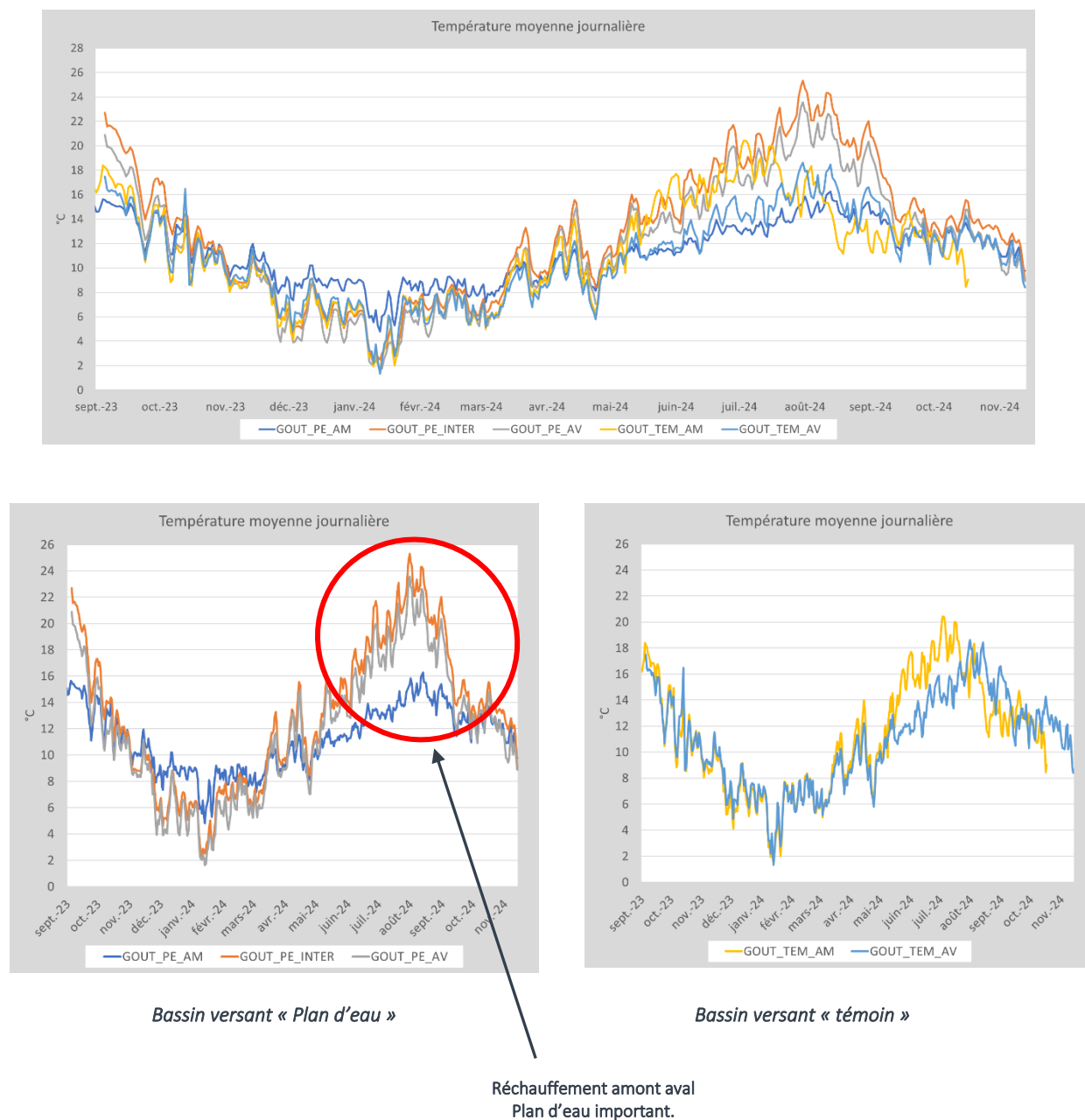


Bassin versant « témoin »

6.6.2.2 Température – Suivi en continu

Les phénomènes de réchauffement des eaux en aval des plans d'eau est bien visible au niveau de ce site. Les modalités d'évacuation des eaux par surverse expliquent cette situation. En été l'eau se réchauffe à la surface du plan d'eau alors que c'est le contraire qui se produit en période hivernale.

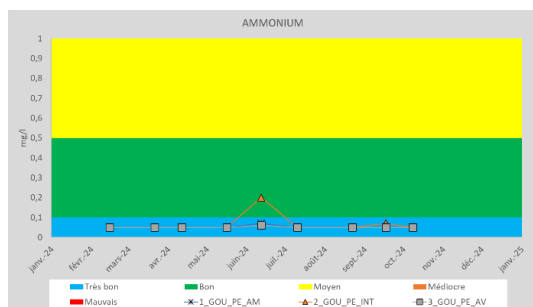
Illustration 67 : Température – Site de Gouttières



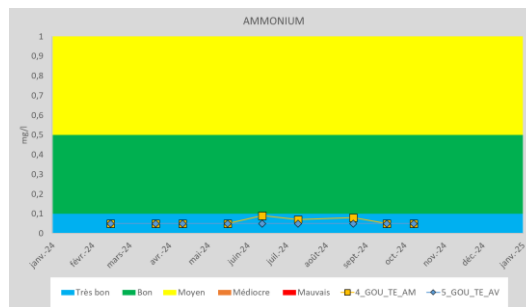
6.6.2.3 Ammonium

Les concentrations en ammonium restent globalement stables tout au long de l'année et équivalentes entre les différents points de suivi. Une augmentation ponctuelle est toutefois observée en juin 2024 au point GOU_PE_INT.

Illustration 68 : Concentration en ammonium - site de Gouttières



Bassin versant « Plan d'eau »



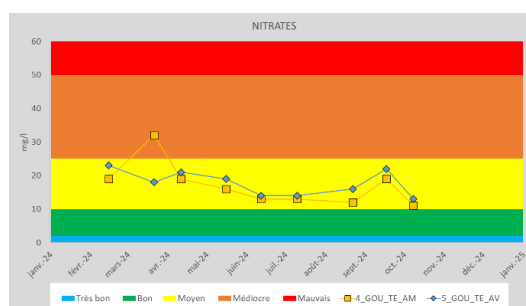
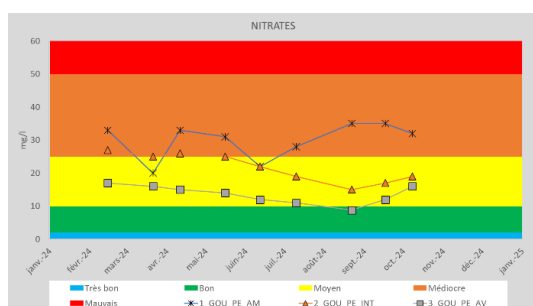
Bassin versant « témoin »

6.6.2.4 Nitrates

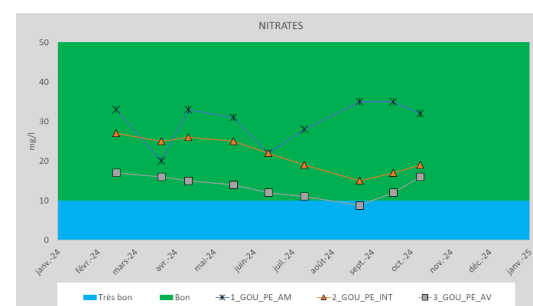
Les concentrations en nitrates varient entre les classes moyenne et médiocre tout au long de la période de suivi. Le plan d'eau ne semble pas influencer significativement la concentration en nitrates. Les pratiques agricoles (amendement des sols pour les cultures ou les prairies) expliquent sans doute ces variations.

Illustration 69 : Concentration en nitrates - site de Gouttières

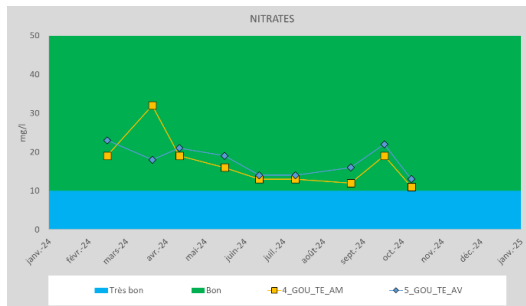
Grille SEQ-EAU



Grille DCE



Bassin versant « Plan d'eau »

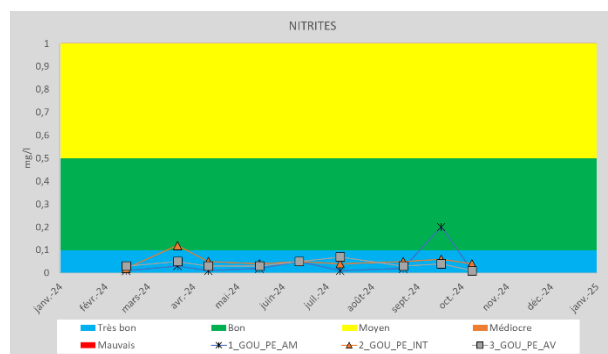


Bassin versant « témoin »

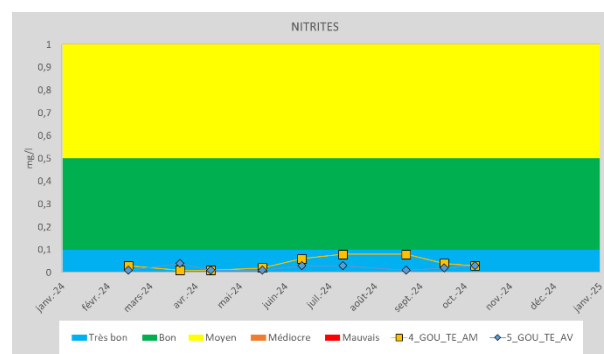
6.6.2.5 Nitrites

Les concentrations en nitrites restent très bonnes tout au long de la période de suivi et pour tous les points de mesure. Le plan d'eau ne semble pas avoir d'impact ce paramètre.

Illustration 70 : Concentration en nitrites - site de Gouttières



Bassin versant « Plan d'eau »



Bassin versant « témoin »

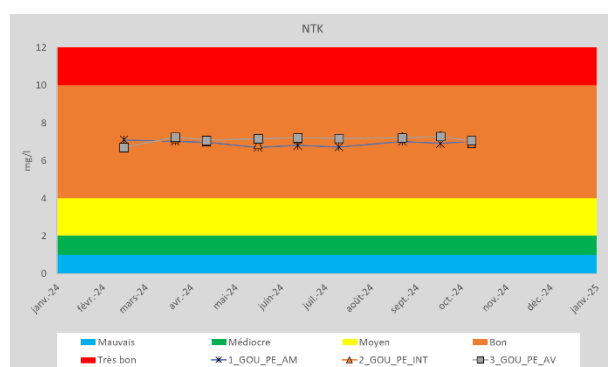
6.6.2.6 Azote Kjeldahl (NTK)

Les concentrations en azote Kjeldahl sont élevées toute l'année, sans variation suivant les points de suivis. S'il existait une incidence « plan d'eau » celle-ci serait masquée au regard des concentrations mesurées en amont.

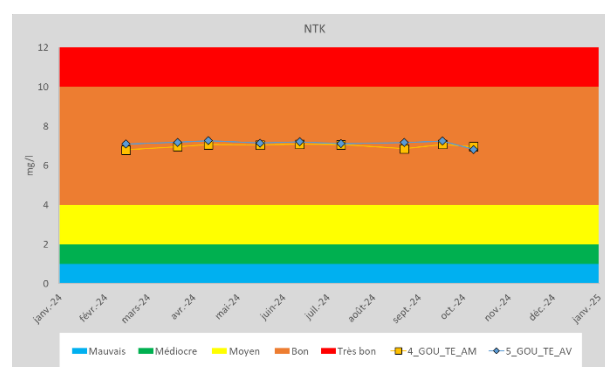
La présence d'azote sous forme organique est à l'origine de cette situation (très faible concentration en ammonium).

L'activité agricole sur les deux bassins versants de ce site (sur fertilisation organique, surpâturage) peut être suspectée pour expliquer cette situation (teneurs importantes en azote organique et en nitrates).

Illustration 71 : Concentration en Azote Kjeldahl - - site de Gouttières



Bassin versant « Plan d'eau »



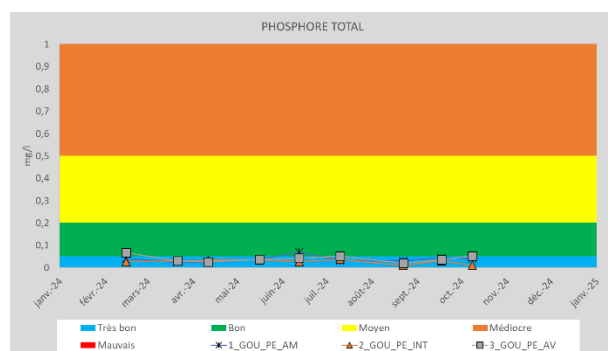
Bassin versant « témoin »

6.6.2.7 Phosphore

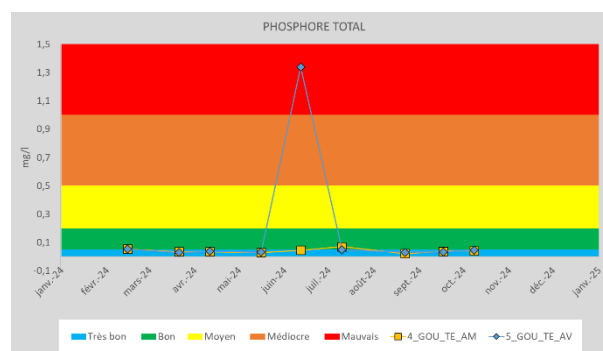
La qualité phosphore total est globalement très bonne sur l'ensemble de la période de suivi et pour tous les points d'intervention. Une « anomalie » ponctuelle, avec une concentration classée en état mauvais, est observée sur le bassin versant témoin aval (GOUT_TE_AV).

Cette anomalie pourrait être liée à une erreur de prélèvement ou de mesure, car aucun autre paramètre ne montre de variation notable à cette date.

Illustration 72 : Concentrations en phosphore total - site de Gouttières



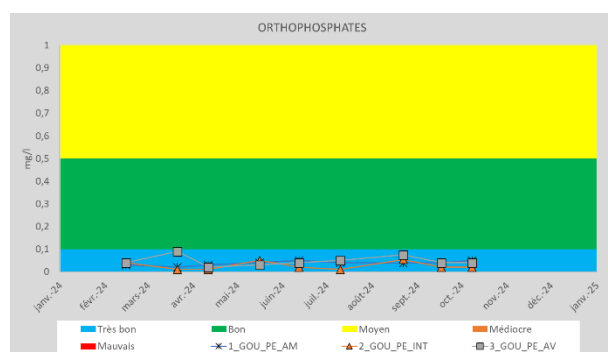
Bassin versant « Plan d'eau »



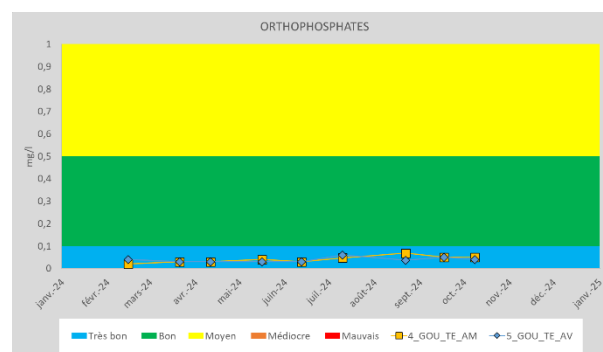
Bassin versant « témoin »

Les concentrations en orthophosphates restent stables tout au long des campagnes de suivi et se situent dans la classe « très bon » pour l'ensemble des points de mesure, sans différence entre les points de suivis et les évolutions amont-aval.

Illustration 73 : Concentrations en orthophosphates- site de Gouttières



Bassin versant « Plan d'eau »

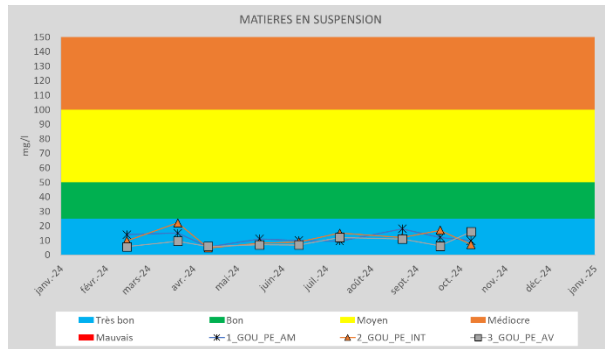


Bassin versant « témoin »

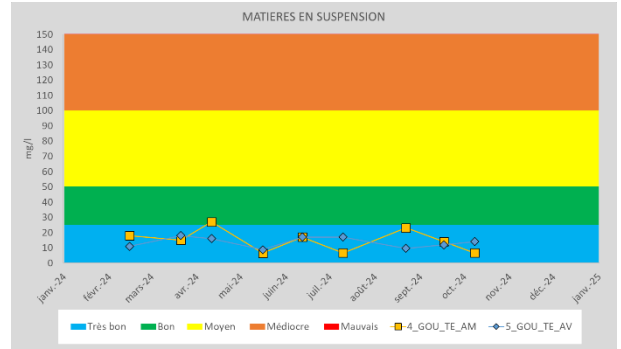
6.6.2.8 Matières en suspension

La concentration en matières en suspension est stable tout au long des campagnes de suivi et se maintient dans la classe « très bon » pour l'ensemble des points de mesure.

Illustration 74 : Concentrations en matières en suspension - site de Gouttières



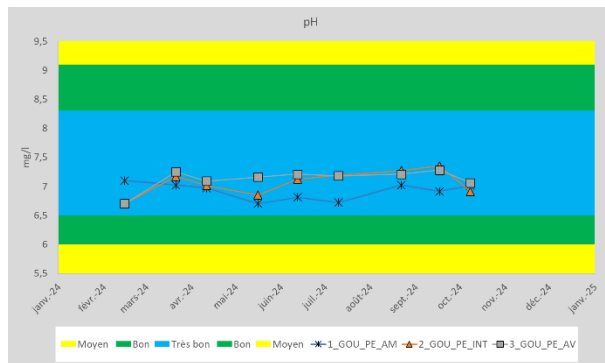
Bassin versant « Plan d'eau »



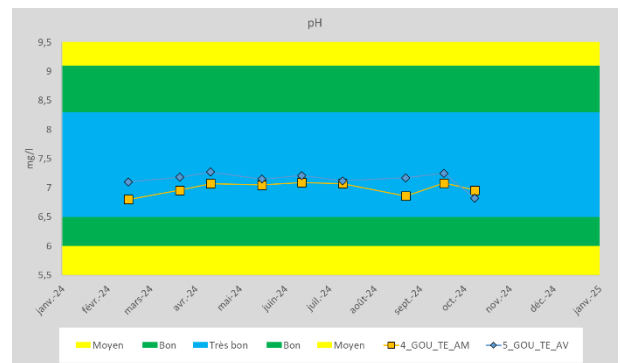
Bassin versant « témoin »

6.6.2.9 Acidité - pH

Illustration 75 : Acidité -- site de Gouttières



Bassin versant « Plan d'eau »



Bassin versant « témoin »

Le suivi ne met pas en évidence de pH pouvant remettre en cause les usages et les fonctionnalités du milieu aquatique. Les pH mesurés restent compris entre 6,5 et 7,5 tout au long de l'année. Le caractère légèrement plus acide par rapport à ce qui est mesuré au niveau de Lapeyrouse est probablement attribuable au contexte géologique avec un encaissant rocheux plus acide.

6.6.2.10 Synthèse – Site de Gouttières

La qualité globale des eaux sur les bassins versants de Gouttières est généralement très bonne pour la majorité des paramètres étudiés.

Les nitrates et l'azote Kjeldahl constituent une exception notable, avec des concentrations qui placent les cours d'eau dans la catégorie « moyenne » voire « médiocre ». Cette situation constatée sur les deux bassins versants (« plan d'eau » - « témoin ») apparaît être directement en lien avec les pratiques agricoles sur cette partie du bassin versant de la Sioule.

L'instrumentation met en évidence les phénomènes de réchauffement des eaux pouvant être constatées en aval des plans d'eau en période estivale.

En dehors de cette thématique, on constate très peu d'écart entre le bassin versant « plan d'eau » et le bassin versant « témoin ».

7. Bilan et conclusions

Le suivi mis en place sur le bassin de la Sioule dans le cadre de l'étude préalable à l'analyse « Hydrologie, Milieu, Usages, Climat » avait pour objectif d'apporter des données « locales » concernant l'incidence quantitative et qualitative de plans d'eau sur les cours d'eau, notamment sur la période de basses eaux (fin de printemps, été et début d'automne). Il s'agit d'évaluer l'incidence en fonctionnement « normal » des plans d'eau (sans intégrer des opérations de vidange).

L'instrumentation a été réalisée sur deux sites distincts, Lapeyrouse et Gouttières (63), avec pour chacun un bassin versant intégrant des plans d'eau (bassin « plan d'eau ») et un autre sans (ou avec très peu) de plans d'eau (bassin « témoin »). Le suivi a été réalisé sur une durée de 14 mois, couvrant notamment l'automne 2023 qui faisait suite à un été très chaud et sec, et les trois premiers trimestres 2024 (dont toute la période estivale) avec des conditions plus humides mais toujours bien chaudes.

- **Conditions de suivi (sites instrumentés - météorologie)**

Le site de Lapeyrouse est représentatif des bassins versants avec des plans d'eau de taille significative, ayant fait l'objet de mise en conformité réglementaire (évacuation des eaux par des ouvrages moines, débits réservés, ...). Sur ce site la part des plans d'eau est également importante puisqu'elle représente près de 4,5% du bassin versant étudié. Le site de Gouttières est quand lui représentatif des petits plans d'eau présents sur cours d'eau, fonctionnant uniquement par surverse. Sur ce site, la part des plans d'eau est beaucoup plus faible puisqu'elle représente moins de 1% du bassin versant étudié.

Le suivi a débuté à la fin de l'été 2023 (début des enregistrements au 1^{er} septembre) pour se terminer en novembre 2024, ingérant ainsi l'été 2024.

L'année 2023 s'est caractérisée comme une année exceptionnellement déficitaire en eau. Le début du suivi s'est d'ailleurs fait pour certains cours d'eau en période de très faible débit voire de tarissement.

Faisant suite à une année 2023 exceptionnellement sèche, l'année 2024 a été plus humide, avec notamment un printemps et un été pluvieux. L'étiage hydrologique 2024 a été peu marqué et relativement court (août 2024) en raison du retour à des conditions pluvieuses à la fin de l'été et à l'automne.

Le suivi intègre donc deux situations hydroclimatiques différentes, l'étiage de 2024 se rapprochant le plus des conditions moyennes rencontrées actuellement sur le bassin versant de la Sioule.

- **Contexte physique pouvant influencer le fonctionnement hydrologique**

- *Occupation du sol*

Les deux zones d'études se situent dans un contexte rural ; bassin versant « plan d'eau » et bassin versant « témoin » présentent des caractéristiques très similaires. Le site de Lapeyrouse apparaît plus ouvert avec beaucoup moins d'espaces boisés que sur le site de Gouttières.

- *Géologie et hydrogéologie*

Les deux sites se situent chacun dans des contextes géologiques où les impluviums hydrologique et hydrogéologique peuvent être considérés comme similaires.

Le réseau hydrographique est directement alimenté par les eaux de ruissellement de l'impluvium topographique et les eaux s'écoulant dans les formations d'arène superficielle, se développant au droit des formations plutoniques et métamorphiques.

Le contexte hydrologique en période estivale est fortement influencé par le contexte géologique. Le site de Lapeyrouse apparaît plus « séchant » que celui de Gouttières. Cette différence de comportement s'explique par la présence de formations rocheuses à l'affleurement majoritairement métamorphiques (schistes et grès), par opposition au site de Gouttières où ce sont les formations granitiques qui sont les plus représentées. Les arènes qui se développent dans ces dernières permettent de mieux réguler la lente restitution des eaux météoriques infiltrées qui convergent vers les axes naturels d'écoulement et qui alimentent le réseau hydrographique.

- **Evaporation sur plan d'eau**

L'évaluation des phénomènes d'évaporation faites à partir de mesures sur bacs d'évaporation et de données météorologiques (température extérieure, conditions de vent, puissance de l'ensoleillement et taux d'humidité de l'atmosphère) permettent d'appréhender l'ampleur de ce phénomène.

Sur la zone d'étude, la lame d'eau évaporée au droit d'une surface en eau est comprise entre 20 et 170 mm selon les mois. On peut retenir comme ordre de grandeur, une évaporation moyenne :

- de l'ordre de 0,5 à 1 mm par jour en période hivernale (Novembre - Décembre - Janvier) ;
- de l'ordre 4 à 6 mm par jour en période estivale (Juillet-Août-Septembre) ;
- de l'ordre de 1,5 à 3,5 mm par jour le reste de l'année.

Les bilans hydroclimatiques réalisés pendant la période de suivi pour un couvert végétal prairial montrent que l'excédent de pertes d'eau lié aux phénomènes d'évaporation sur plan d'eau par rapport à l'évapotranspiration d'une prairie se fait principalement en période estivale entre mai et septembre. Pendant ces mois, la perte d'écoulement peut être évaluée entre 0,3 et 0,8 l/s/ha de surface en eau.

L'incidence sur l'hydrologie des cours d'eau est donc directement liée à la taille des plans d'eau par rapport à la taille du bassin versant. Sur les bassins étudiés, aucun déficit hydrique marqué n'a été mis en évidence par l'instrumentation....

Sur le site de Lapeyrouse, fuites et équipements de vidange des plans d'eau (moine avec débit réservé se faisant par un ajutage en position intermédiaire) assurent même une restitution réduite pendant les situations d'étiage extrême (cas de l'été 2023). Le marnage des plans d'eau occasionné par ce déstockage lorsqu'il est conséquent (0,5 à 1 m) peut alors se répercuter sur l'hydrologie au moment du retour à des conditions pluvieuses, avec un décalage dans la mise en transparence des plans d'eau vis-à-vis de la restitution des écoulements en aval. Sur le site de Lapeyrouse, le décalage a atteint 2 à 3 semaines, alors qu'il est de l'ordre du pas de temps journaliers sur le site de Gouttières en raison de la faible emprise des plans d'eau (surface en eau et surface en eau par rapport à la taille du bassin versant).

- **Thermie des eaux**

Les résultats issus du suivi mettent en évidence une situation contrastée directement dépendante des modalités d'évacuation des eaux du plan d'eau et de ses équipements :

- **Plans d'eau fonctionnant par surverse.**

On assiste à un réchauffement des eaux en période estivale et à un refroidissement en période hivernale. Le réchauffement peut atteindre 6 à 8°C en plein mois d'août lorsque l'écoulement amont est très faible.

- **Plans d'eau équipé d'un moine**

L'effet thermique est beaucoup moins marqué. Pour le cas des plans d'eau du secteur de Lapeyrouse on assiste même à un léger abaissement des températures entre l'amont et l'aval.

- **Qualité des eaux**

Le suivi réalisé ne met pas en évidence d'évolution significative de la qualité des eaux entre l'amont et l'aval. L'impact est visible principalement sur les formes azotées dont les formes d'expression sont directement dépendantes des conditions d'oxygénation.

Si les modalités de vidange du plan d'eau en période estivale sont à l'origine d'une sous oxygénation des écoulements, dans ce cas l'azote est présent sous la forme d'ammonium et non de nitrates. Cet ammonium associé aux faibles concentrations en oxygène dissous, peuvent être à l'origine d'un déclassement de qualité du cours d'eau sur un linéaire plus ou moins important, qui reste fonction des conditions de brassage permettant la réoxygénation des écoulements. Un apport en phosphore organique peut être également constaté en aval de certains plans d'eau en période estivale en lien avec le développement algal dans la colonne d'eau.

Le suivi n'a pas permis de mettre en évidence les effets liés à une eutrophisation massive des plans d'eau en période estivale dans la mesure où l'étiage 2024 n'a pas été suffisamment long pour générer des problèmes liés au développement de cyanobactéries (phénomène très souvent constaté sur le site de Lapeyrouse qui remet en cause l'usage baignade du plan d'eau et qui peut générer une charge organique élevée dans les écoulements en aval).

- **Généralisation des observations à l'échelle du territoire**

Les modalités de réalisation de ce suivi ne permettent pas de faire ressortir des règles pouvant être retransposées à l'ensemble du territoire pour deux raisons :

- **Les conditions climatiques ont été peu favorables pendant la période d'instrumentation.** Le début du suivi est réalisé à la fin d'un épisode de sécheresse extrême (fin été 2023) avec des débits très faibles voire des assèchements sur certains cours d'eau, impactés ou non par des plans d'eau. Le second étiage (été 2024) a été très peu marqué et les conditions pluvieuses printanière et automnale n'ont pas généré de problème spécifique de ressource en eau.
- **Les observations peuvent parfois être antagonistes pour une même typologie de bassin versant.** On constate que ces situations sont directement liées :
 - aux modalités d'évacuation des eaux dans les plans d'eau et les équipements en place (trop plein, moine, drainage digue,...)
 - à la taille des plans d'eau et leur positionnement sur le réseau hydrographique (bassin versant intercepté et risque de perte d'écoulement en période estivale).

A l'échelle d'un territoire, la caractérisation fine et descriptive du fonctionnement de chaque plan d'eau apparaît comme un des principaux facteurs pour caractériser l'éventuelle incidence sur le fonctionnement hydrologique et biologique des cours d'eau. Chaque ouvrage peut selon ses modalités de gestion et ses équipements avoir une incidence plus ou moins marquée sur l'hydrologie ou la qualité des écoulements des cours d'eau sur lesquels il se trouve.

La mise en dérivation systématique des plans d'eau reste la solution la plus satisfaisante pour limiter les incidences qu'elles soient hydrologiques, thermiques ou physico-chimiques.

